

THÈSE PRÉPARÉE EN COTUTELLE ET PRÉSENTÉ CONJOINTEMENT À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC -  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À  
TROIS-RIVIÈRES

ET À

L'UNIVERSITÉ DE  
BOURGOGNE  
FRANCHE-COMTE

INSTITUT DE RECHERCHE  
SUR L'HYDROGÈNE  
GROUPE DE RECHERCHE  
EN ÉLECTRONIQUE  
INDUSTRIELLE

LABORATOIRE FEMTO-ST  
(UMR CNRS 6174)  
FÉDÉRATION DE  
RECHERCHE FCLAB  
(FR CNRS 3539)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE  
ÉLECTRIQUE ET DE GÉNIE  
INFORMATIQUE

ÉCOLE DOCTORALE  
SCIENCES POUR  
L'INGÉNIEUR ET  
MICROTECHNIQUES

COMME EXIGENCE PARTIELLE DU DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR

NEIGEL MARX

GESTION ÉNERGÉTIQUE ET DIMENSIONNEMENT DES SYSTÈMES  
HYBRIDES MULTI-PILE À COMBUSTIBLE ET BATTERIE POUR  
APPLICATION AU TRANSPORT AUTOMOBILE

DÉCEMBRE 2017

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À  
TROIS-RIVIÈRES

DOCTORAT EN GÉNIE  
ÉLECTRIQUE (PH.D.)

Programme offert par l'Université du  
Québec à Trois-Rivières

UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE  
FRANCHE-COMTÉ

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE  
BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ  
(SPÉCIALITÉ : SCIENCES POUR  
L'INGÉNIEUR)

Programme offert par l'Université de  
Bourgogne Franche-Comté

GESTION ÉNERGÉTIQUE ET DIMENSIONNEMENT DES SYSTÈMES  
HYBRIDES MULTI-PILE À COMBUSTIBLE ET BATTERIE POUR  
APPLICATION AU TRANSPORT AUTOMOBILE

PAR

NEIGEL MARX

Kamal AL HADDAD	Président du jury	Ecole de Technologie Supérieure de Montréal
Geneviève DAUPHIN-TANGUY	Rapporteur	Ecole Centrale de Lille
Xavier ROBOAM	Rapporteur	Université de Toulouse
Maxime DUBOIS	Évaluateur externe	Université de Sherbrooke
Loïc BOULON	Directeur de thèse	Université du Québec à Trois-Rivières
Daniel HISSEL	Directeur de thèse	Université de Bourgogne Franche-Comté
Kodjo AGBOSSOU	Co-directeur de thèse	Université du Québec à Trois-Rivières
Frédéric GUSTIN	Co-directeur de thèse	Université de Bourgogne Franche-Comté

Thèse soutenue le 12 juillet 2017





## REMERCIEMENTS

Au cours de ce doctorat, j'ai eu l'occasion de rencontrer une multitude de personnes qui ont fait de cette période de ma vie une aventure enrichissante et constructive pour mon avenir. Il m'était impensable de ne pas les remercier au sein de ce manuscrit.

Je commencerais par mon encadrement au Canada et en France. Je tiens à remercier Loïc, Daniel, Frédéric et Kodjo. Ils m'ont fait confiance lorsqu'ils m'ont accepté en doctorat et c'est grâce à leurs conseils et à leur patience que ces travaux ont pu arriver à leurs termes.

Il me faut également remercier mes collègues et amis des deux laboratoires sans lesquels cette aventure n'aurait pas été pleine de rencontres, voyages et discussions inoubliables. Tout d'abord, ceux du Canada en commençant par mon colloc' Nilson, mon compatriote Joris, notre cher burkinabé Jacques, le sage Boubacar, la sage Fatima, Daniel, Elvira, Mauricio, Pilar, Khalil, Mohammed. Du côté français, je remercie Simon et Soichi pour tous ces bons moments au labo en dehors, Elodie qui m'a supporté pendant deux ans dans le bureau F106, les nouveaux du bureau F106 Abdelkader et Su Yao, Pierre « le vieux » et tous les autres Rafaele, Djafar, Rania, Hailong, Amel, Samir, Sebastien, Sondo.

Mes amis proches, Rebecca, Nicolas, m'ont soutenu tout au long de cette aventure durant les bonnes et les moins bonnes périodes. Je sais que je pourrais toujours compter sur vous. Bien-sûr ma mère m'a également soutenu tout au long de ma vie et en particulier durant ce doctorat et c'est principalement grâce à elle que j'ai pu en arriver là. Finalement, j'ai une pensée pour mon père qui n'a pas pu me voir débiter ou finir ce doctorat.

Finalement, je tiens à remercier les membres de mon jury de thèse qui ont bien voulu participer à l'évaluation de mes travaux et m'ont fourni un retour très apprécié qui m'a permis de compléter ce manuscrit.





# NOMENCLATURE

$A$	Surface caractéristique de la convection libre ( $m^2$ )
$A_f$	Surface caractéristique de la convection forcée ( $m^2$ )
$b_{11}$	Paramètre identifié expérimentalement
$b_{12}$	Paramètre identifié expérimentalement
$C_d$	Coefficient de traînée des pâles du ventilateur
$C_{PAC}$	Capacité thermique du stack ( $J \cdot K^{-1}$ )
$E$	Force électromotrice du moteur DC (V)
$e_b$	Largeur des pâles du ventilateur (m)
$E_c$	Énergie d'activation de la réaction ( $66kJ \cdot mol^{-1}$ )
$E_n$	Potentiel de Nernst (V)
$F$	Constante de Faraday ( $96485 A \cdot mol^{-1}$ )
$\bar{h}$	Coefficient moyen de transfert thermique par la convection forcée ( $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$ )
$\Delta H$	Enthalpie de réaction (W)
$I_{conv}$	Courant débitée par le convertisseur (A)
$I_{FAN}$	Courant fournie au moteur DC (A)
$I_{PAC}$	Courant de pile (A)
$I_{loss}$	Courant de perte dans le convertisseur (A)
$j$	Densité de courant ( $A \cdot m^{-2}$ )
$j_0$	Densité de courant d'échange ( $A \cdot m^{-2}$ )
$J_{FAN}$	Inertie de la partie tournante du ventilateur ( $kg \cdot m^2$ )
$j_L$	Limite de densité de courant ( $A \cdot m^{-2}$ )
$j_{loss}$	Densité de courant de fuites ( $A \cdot m^{-2}$ )
$K$	Gain de l'équation différentielle (3.9) ( $\Omega$ )
$K_1$	Coefficient d'ajustement
$K_2$	Coefficient d'ajustement ( $A \cdot cm^{-2}$ )
$K_3$	Coefficient d'ajustement ( $V \cdot K^{-1}$ )
$K_4$	Coefficient d'ajustement ( $\Omega \cdot cm^2$ )
$K_5$	Coefficient d'ajustement (K)
$k_{aero}$	Coefficient traduisant la conversion mécanique-aéraulique
$K_{purge}$	État de la valve de purge
$L_{conv}$	Inductance du convertisseur de puissance (H)
$L_{FAN}$	Inductance du moteur DC (H)
$N_b$	Nombre de pâles

$N_{cell}$	Nombre de cellules
$P_0$	Pression standard ( $Pa$ )
$P_{air}$	Pression de l'air dans la chambre cathodique ( $Pa$ )
$P_{air,out}$	Pression de l'air en sortie de pile ( $Pa$ )
$P_{O_2}$	Pression de l'oxygène dans la chambre cathodique ( $Pa$ )
$P_{H_2}$	Pression de l'hydrogène dans la chambre anodique ( $Pa$ )
$P_{H_2,in}$	Pression de sortie du réservoir d'hydrogène ( $Pa$ )
$P_{H_2,out}$	Pression en sortie du circuit d'hydrogène ( $Pa$ )
$q_{air,in}$	Flux d'air en entrée de cathode ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
$q_{air,fan}$	Flux d'air expulsé de $V_{fan}$ par les ventilateurs ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
$q_{air,out}$	Flux d'air en sortie de cathode ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
$q_{conv}$	Transfert thermique par convection ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
$q_{H_2,r}$	Flux d'hydrogène consommé par la réaction ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
$q_{H_2,out}$	Flux d'hydrogène évacué par la purge ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
$q_{H_2,c}$	Flux d'hydrogène consommé par la pile ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
$q_{O_2,r}$	Flux d'oxygène consommé par la réaction ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
$q_{H_2,in}$	Flux d'hydrogène venant du réservoir d'hydrogène ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
$R$	Constante des gaz parfaits ( $8,314 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ )
$R_0$	Rayon de début des pales du ventilateur ( $m$ )
$R_{air}$	Résistance hydraulique entre l'entrée et la sortie de la cathode ( $Pa \cdot s \cdot m^{-3}$ )
$R_b$	Rayon des pâles du ventilateur ( $m$ )
$R_{FAN}$	Résistance interne du moteur DC ( $\Omega$ )
$R_{H_2}$	Résistance hydraulique du circuit $H_2$ entre le réservoir et l'anode ( $Pa \cdot s \cdot m^{-3}$ )
$R_m$	Résistance de la membrane ( $\Omega$ )
$R_{purge}$	Résistance associée à la purge d'hydrogène ( $Pa \cdot s \cdot m^{-3}$ )
$\Delta S_{conv,Air}$	Flux d'entropie de la pile vers l'air ( $W \cdot K^{-1}$ )
$\Delta S_{conv,FC}$	Flux d'entropie de l'air vers la pile ( $W \cdot K^{-1}$ )
$\Delta S_q$	Flux d'entropie généré par la réaction
$T_0$	Température standard (298, 15 K)
$T_{aero}$	Couple résistant créé par les forces de traînée ( $N \cdot m$ )
$T_{air}$	Température de l'air (K)
$T_{FC}$	Température moyenne du stack (K)
$T_m$	Couple fourni par le moteur DC ( $N \cdot m$ )
$t_{mb}$	épaisseur de membrane ( $m$ )
$T_{loss}$	Couple résistant traduisant les pertes fer et mécanique ( $N \cdot m$ )
$U_{bus}$	Tension de bus (V)
$U_{conv}$	Tension de sortie du convertisseur (V)
$U_{FC}$	Tension de stack (V)
$\Delta V_{act}$	Surtension d'activation (V)

$\Delta V_{conc}$	Surtension de concentration (V)
$\Delta V_{ohm}$	Surtension ohmique (V)
$V_{AN}$	Volume de la chambre anodique ( $m^3$ )
$V_{cell}$	Tension de cellule (V)
$V_{mol}$	Volume d'une mol de gaz parfait ( $m^3$ )
$V_{fan}$	Volume compris entre la pile et les ventilateurs ( $m^3$ )
$x_{O_2}$	Pression partielle d'oxygène (0.2095)
$\alpha$	Rapport cyclique du convertisseur
$\eta_{aero}$	Rendement de la conversion mécanique aéraulique
$\eta_{therm}$	Rendement de la convection forcée
$\Lambda_{mb}$	Contenu aqueux de la membrane (14)
$\Omega$	Vitesse de rotation du moteur DC ( $s^{-1}$ )
$\tau$	Constante de temps de l'équation différentielle (3.9) (s)
$\theta$	Angle d'attaque des pâles du ventilateur ( $^\circ$ )
$\theta_{b,lm}$	Température moyenne logarithmique de surface (K)

# SOMMAIRE

<b>I</b>	<b>Contexte et problématique</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
1.1	Contexte . . . . .	3
1.1.1	Contexte environnemental et économique . . . . .	3
1.1.2	Le transport et l'automobile . . . . .	5
1.1.3	Les technologies alternatives pour le transport . . . . .	6
1.2	La pile à combustible . . . . .	6
1.3	Définition de l'étude . . . . .	7
1.4	Description des laboratoires d'accueil . . . . .	8
<b>2</b>	<b>État de l'art et démarche scientifique adoptée</b>	<b>11</b>
2.1	Systèmes multi-sources - multi-actionneurs . . . . .	11
2.1.1	Motorisation électrique . . . . .	11
2.1.2	Batterie . . . . .	12
2.1.2.1	Discussion . . . . .	14
2.2	Systèmes multi-pile à combustible . . . . .	14
2.2.1	Architectures . . . . .	15
2.2.1.1	Architecture fluide . . . . .	15
2.2.1.2	Architecture électrique . . . . .	17
2.2.2	Topologies de convertisseur de puissance . . . . .	19
2.2.3	Impact de l'architecture sur la puissance maximale . . . . .	19
2.2.4	Distribution de la puissance . . . . .	20
2.2.5	Modes dégradés . . . . .	21
2.2.6	Distribution des thèmes de recherche et discussion . . . . .	23
2.3	Contrôle des systèmes redondants . . . . .	23
2.3.1	Méthodes de répartition de l'effort . . . . .	24
2.3.1.1	Méthode de l'inverse généralisé . . . . .	24
2.3.1.2	Méthode du "daisy-chaining" . . . . .	25



2.3.1.3	Méthode optimale . . . . .	25
2.3.1.4	Comparaison du rendement en condition expérimentale . . . . .	25
2.3.1.5	Discussion . . . . .	28
2.4	Problématique de recherche . . . . .	28
2.5	Objectifs de recherche . . . . .	30
2.6	Méthodologie . . . . .	30
2.7	Organisation de la thèse . . . . .	31

## **II Contribution . . . . . 33**

### **3 Modélisation . . . . . 35**

3.1	Banc de test multi-pile à combustible . . . . .	35
3.2	Principe de fonctionnement de la pile à combustible . . . . .	36
3.3	Comportement énergétique . . . . .	37
3.3.1	Stack . . . . .	38
3.3.1.1	Électrochimie . . . . .	38
3.3.1.2	Apport en réactif . . . . .	40
3.3.1.3	Comportement thermique . . . . .	43
3.3.2	Convertisseur de puissance . . . . .	44
3.3.3	Ventilateurs . . . . .	44
3.3.3.1	Moteur DC . . . . .	45
3.3.3.2	Pales et modèle aérolique . . . . .	46
3.3.4	Batteries . . . . .	46
3.3.5	Modèle global REM . . . . .	48
3.3.6	Paramétrage du modèle . . . . .	49
3.3.6.1	Tension de sortie - température - débit d'hydrogène . . . . .	49
3.3.6.2	Convertisseur de puissance . . . . .	50
3.3.6.3	Moteur DC et modèle aéraulique . . . . .	51
3.3.6.4	Paramètres . . . . .	52
3.4	Vieillessement . . . . .	53
3.4.1	Pile à combustible . . . . .	54
3.4.1.1	Cyclage - potentiel . . . . .	54
3.4.1.2	Cyclage - démarrage/arrêt . . . . .	54

3.4.1.3	Manque de carburant . . . . .	54
3.4.1.4	Température - humidité relative . . . . .	54
3.4.1.5	Modélisation . . . . .	55
3.4.2	Batterie . . . . .	56
3.5	Conclusion . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Distribution de puissance optimale</b>	<b>57</b>
4.1	Définition de l'étude . . . . .	57
4.1.1	Dimensionnement du système . . . . .	59
4.1.1.1	Modélisation du système PAC et de la batterie . . . . .	61
4.1.2	Définition du problème d'optimisation . . . . .	62
4.1.2.1	Espace de recherche . . . . .	62
4.1.2.2	Fonction objectif . . . . .	64
4.1.2.3	Énoncé du problème d'optimisation . . . . .	65
4.1.3	Méthode de résolution . . . . .	66
4.1.3.1	Choix de la méthode d'optimisation . . . . .	66
4.1.3.2	Programmation dynamique . . . . .	67
4.1.3.3	Implémentation . . . . .	69
4.2	Résultats d'optimisation . . . . .	71
4.2.1	Présentation des résultats . . . . .	72
4.2.1.1	Profils de puissance . . . . .	72
4.2.1.2	Consommation, Nombre de démarrages et dégradations	72
4.2.2	Analyse . . . . .	79
4.2.2.1	Comportement . . . . .	79
4.2.2.2	Cout d'exploitation et dégradation . . . . .	81
4.3	Conclusion . . . . .	83
<b>5</b>	<b>Stratégie de gestion énergétique en ligne</b>	<b>85</b>
5.1	Proposition de stratégie de gestion énergétique . . . . .	86
5.1.1	Description de la méthodologie de gestion énergétique . . . . .	86
5.1.2	Identification du parcours de conduite . . . . .	87
5.1.3	Gestion du démarrage des systèmes pile à combustible . . . . .	90
5.1.3.1	Théorie de décision Bayésienne . . . . .	90
5.1.3.2	Évaluation des coûts . . . . .	91

5.1.3.3	Cas du profil inconnu . . . . .	92
5.1.4	Gestion du niveau de puissance . . . . .	92
5.1.4.1	Puissance fournie par le système PAC multi-pile . . . . .	92
5.1.4.2	Puissance fournie individuellement par les systèmes PAC . . . . .	93
5.2	Application . . . . .	96
5.2.1	Création de profils de conduite . . . . .	96
5.2.1.1	Analyse des types de conduite . . . . .	96
5.2.1.2	Comportement du véhicule . . . . .	98
5.2.1.3	Création de profils de conduite . . . . .	98
5.2.2	Résultats de simulation et exploitation . . . . .	98
5.2.2.1	Définition de l'étude . . . . .	98
5.2.2.2	Stratégies de gestion énergétique . . . . .	100
5.2.2.3	Présentation des résultats . . . . .	102
5.2.2.4	Analyse des résultats . . . . .	102
5.3	Conclusion . . . . .	109
<b>III</b>	<b>Conclusion</b>	<b>111</b>
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>113</b>
6.1	Travaux effectués . . . . .	113
6.2	Perspectives . . . . .	114
<b>IV</b>	<b>Annexes</b>	<b>131</b>
<b>A</b>	<b>Programmation dynamique et calcul haute performance</b>	<b>133</b>
<b>B</b>	<b>Profils de puissance individuels optimaux</b>	<b>135</b>
<b>C</b>	<b>Distribution de puissance optimale</b>	<b>151</b>
C.1	Conditions de Karush-Kuhn-Tucker . . . . .	151
C.2	Introduction de la consommation des auxiliaires . . . . .	153
C.3	Interprétation . . . . .	155
C.4	Implémentation algorithmique . . . . .	155
<b>D</b>	<b>Cycles de conduite considérés</b>	<b>159</b>

<b>E</b>	<b>Comportement des gestions énergétiques en ligne</b>	<b>169</b>
----------	--	------------



# I

## CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE



## INTRODUCTION

### 1.1/ CONTEXTE

Le développement des énergies renouvelables et des technologies s'inscrivant dans une démarche de développement durable prend une ampleur grandissante dans le paysage de la recherche sur la thématique de l'énergie. L'atténuation du changement climatique est l'un des facteurs moteur de ce développement.

#### 1.1.1/ CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET ÉCONOMIQUE

Le changement climatique est un phénomène complexe dont les causes, conséquences et solutions sont nombreuses et profondes. Le rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) les décrit de façon très précise [GIEC, 2015]. D'après ce dernier, les causes principales sont très probablement d'origines humaines. En effets, les simulations basées sur l'impact de phénomènes naturels tels que les éruptions volcaniques ou variations solaires ne permettent pas d'expliquer l'évolution des températures depuis 1950.

L'impact du changement climatique est visible sur les hausses de températures et la fonte de la cryosphère. Ces changements induisent à leur tour une augmentation du niveau des mers mais aussi une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des événements climatiques (sécheresses, pluies diluviennes). Le GIEC émet également des prévisions sur l'augmentation des températures et du niveau des mers. Ces prévisions prennent en compte plusieurs scénarios étant plus ou moins optimistes sur les moyens déployés pour combattre le changement climatique (figure 1.1).

La diminution de la qualité et de la quantité d'eau potable disponible, la baisse du rendement de la production alimentaire engendrée par le changement climatique auraient des répercussions sur nos modes de vie, nos comportements sociaux, notre santé et finalement la biodiversité.

Afin d'atténuer l'impact du changement climatique, différentes mesures sont considérées.



Elles concernent dans un premier temps la production énergétique mais aussi les habitudes de consommation. Plusieurs bras de levier peuvent être utilisés. Sans prendre en compte le changement de nos habitudes de consommation qui est majoritairement affecté par les choix politiques et sociaux, l'augmentation de l'efficacité énergétique de nos moyens de production énergétique est le bras de levier le plus important.

En ce qui concerne le secteur du transport, afin de faire face à la hausse du nombre de passagers et des activités de fret il est nécessaire de se tourner vers des alternatives ayant un rendement plus élevé telles que la pile à combustible ou le tout électrique, de développer des infrastructures favorisant la marche ou le vélo et d'investir dans les transports en commun.

D'un point de vue économique, la dépendance aux énergies fossiles est un facteur important de la fuite des capitaux pour la plupart des pays qui ne disposent pas d'énergies fossiles dans leurs sols. D'autant plus dans le secteur des transports où l'énergie fossile

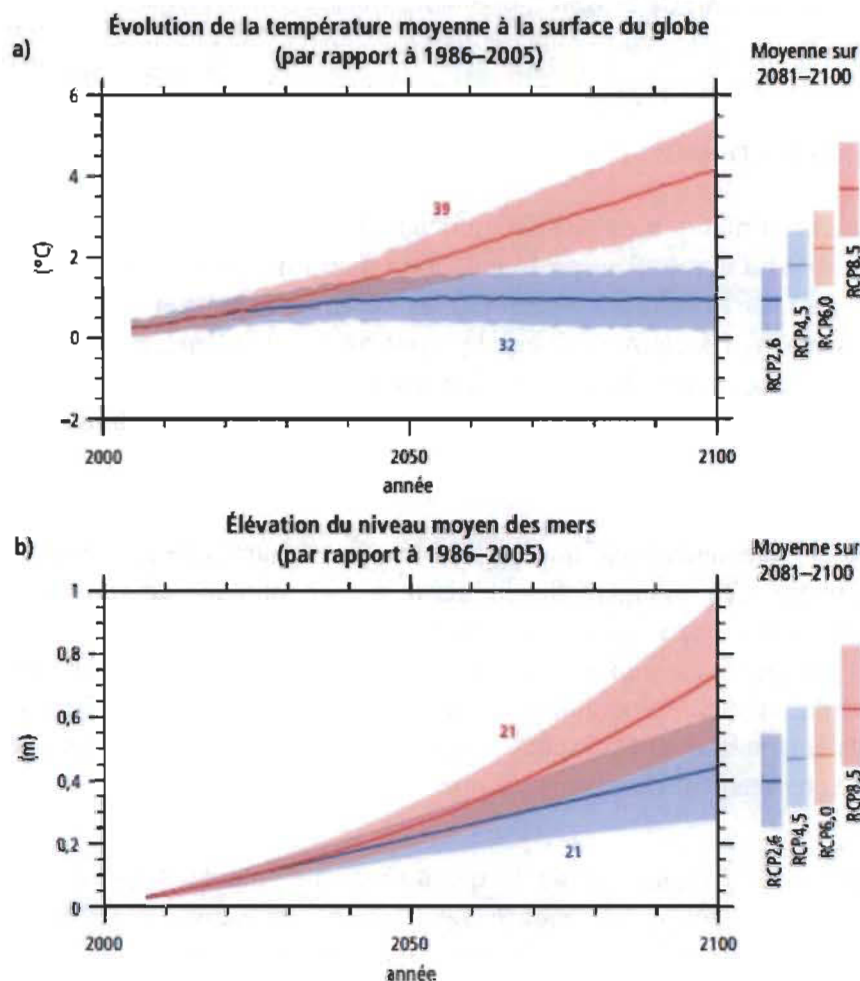


FIGURE 1.1 – Prévisions du GIEC pour les températures et le niveau des mers à l'horizon 2100 [GIEC, 2015]

est de loin la forme d'énergie la plus utilisée. Ainsi, les importations de pétrole et de gaz auront coûté 67 milliards d'euros à la France et 10 milliards de dollars au Québec en 2012 [Cavaud et al., 2016]. La production énergétique du Québec est locale et principalement hydroélectrique alors que la France est très dépendante du nucléaire et dépend donc fortement de l'importation de minerai. Le Québec est donc très proche de l'indépendance énergétique. C'est pourquoi l'électrification du transport au Québec contribuerait fortement à l'obtention de cette indépendance.

Cette fuite de capitaux freine le développement de l'industrie énergétique du renouvelable. De par leur grande diversité, les énergies renouvelables s'adaptent aux conditions de production locales et sont un potentiel de développement économique qui reste à l'heure actuelle sous exploité.

Avec une dépendance aux énergies fossiles très élevée, le secteur du transport constitue un levier majeur de la transition énergétique. Toutefois, la diversité des missions que le transport remplit et les contraintes qui leurs sont associées freinent la transition énergétique.

### 1.1.2/ LE TRANSPORT ET L'AUTOMOBILE

Le secteur du transport est responsable de 30 % de la consommation énergétique française. Cette part non négligeable est majoritairement constituée d'énergie fossile. Le secteur du transport comporte un grand nombre de sous-branches dont la proportion de la consommation énergétique est détaillée dans le tableau 1.1.

TABLE 1.1 – Consommation énergétique en France (2012) pour les différents secteurs du transport (Mtep : méga-tonnes équivalent pétrole) [Finke et al., 2014].

Secteur	Consommation énergétique (Mtep)	Ratio (%)
<b>Routier</b>	39.60	79.4
<i>Marchandise</i>	14.75	29.6
<i>Public</i>	1.10	2.2
<i>Individuel</i>	23.75	47.6
<b>Ferroviaire</b>	0.83	1.6
<b>Maritime</b>	2.80	5.6
<b>Aérien</b>	6.62	13.3

La dépendance aux énergies fossiles est extrêmement importante dans le secteur du transport en France (92%) mais encore plus au Québec (99%). Le secteur du transport englobe le transport de personnes et le transport de marchandises. Chacune de ces sous-branches du secteur des transports possède ses caractéristiques propres. Ainsi les transports ferroviaires, maritimes, routiers et aéronautiques possèdent des taux et potentiels d'électrification différents.

L'électrification du transport ferroviaire peut se faire à moindre coût si le réseau de distribution électrique est bien développé. Le transport aérien ne semble pas pouvoir

être électrifié de façon globale mais les systèmes embarqués pourraient toutefois en bénéficier. Pour sa part, le secteur routier semble être une cible privilégiée de l'électrification.

Les alternatives aux énergies fossiles ont pour la plupart déjà fait leur entrée sur le marché du transport mais restent très peu compétitives pour la plupart des applications.

### 1.1.3/ LES TECHNOLOGIES ALTERNATIVES POUR LE TRANSPORT

Les contraintes relatives au secteur du transport sont nombreuses. Celles concernant les systèmes énergétiques sont principalement liées à la capacité du système à compléter les profils de mission caractéristiques de l'application et au coût d'exploitation. Afin de palier la diversité des profils de mission, les technologies considérées sont principalement évaluées par leur énergie et puissance par unité de masse et de volume, leur rendement, leur temps de recharge et leur coût.

Les solutions tout électrique offrent des rendements très élevés par rapports aux autres solutions. Se reposant sur un stockage de l'énergie électrique par la batterie, ces solutions sont limitées par leurs temps de recharge et leur autonomie. En effet, les technologies lithium et nickel n'offrent pas encore la densité énergétiques nécessaires à de long trajets et sont sensibles aux courants de recharges élevés.

Les solutions électrique à base d'hydrogène offrent un temps de recharge similaires à celui des solutions essence actuelles et une autonomie comparable. Toutefois, la conversion énergie hydrogène - énergie électrique se fait à rendement plus faible que celle de la conversion énergie chimique - énergie électrique au sein d'un accumulateur électrochimique mais plus élevé que celle du moteur à combustion interne. De plus la faible disponibilité de l'hydrogène contribue à la limitation du déploiement de cette technologie.

## 1.2/ LA PILE À COMBUSTIBLE

Plusieurs technologies de piles à combustible existent. Elles se différencient le plus souvent par leur type d'électrolyte et leur température de fonctionnement. La technologie PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) sera considérée au cours de ces travaux car elle fonctionne à basse température et utilise un électrolyte solide plus adapté à une application au transport.

Les performances d'une pile à combustible sont fortement liées aux conditions d'opération auxquelles elle est soumise. Afin de contrôler au mieux ces conditions d'opération il est nécessaire d'inclure des auxiliaires. Ces auxiliaires contrôleront alors la température de la pile, l'apport en réactif et l'adaptation de tension en sortie de pile. Le système pile à combustible est ainsi présenté en figure 1.2.

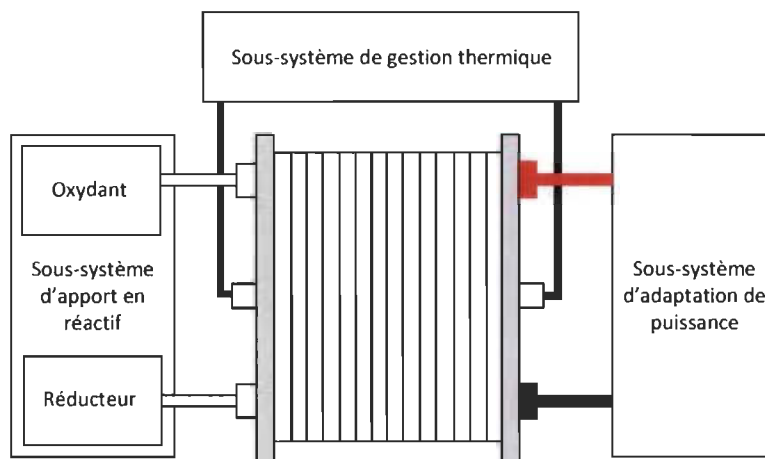


FIGURE 1.2 – Le système pile à combustible

Le contrôle des conditions d'opérations permet d'avoir un degré de contrôle sur les performances de la pile à combustible et de réduire les dégradations subies par celle-ci. Cependant, l'utilisation de ces auxiliaires introduit une consommation énergétique supplémentaire qui devra être prise en charge par la pile.

Les enjeux actuels de la recherche sur les systèmes PEMFC visent à réduire principalement le coût du système et à augmenter sa durée de vie afin que la pile à combustible soit un produit plus compétitif sur le marché. Pour se faire, il est nécessaire d'augmenter le rendement du système, de réduire son coût de production et d'acquérir une meilleure compréhension des phénomènes de dégradation.

Les systèmes pile à combustible (PAC) multiples peuvent offrir un rendement supérieur sur une partie de leur plage de puissance et pourraient grâce à des économies d'échelles permettre de réduire les coûts de production pour les véhicules de niches. La réduction des coûts de production pour les véhicules en grande série n'est toutefois pas garantie à cause de la multiplication des auxiliaires qui représentent une grande partie du coût de ces véhicules. La diversité des profils de mission des applications automobiles offre la possibilité de tirer avantage de la partition du système PAC. L'utilisation d'une partie du système au lieu de la totalité permet de répartir favorablement la dégradation du système et d'opérer à des points de rendement supérieurs ou égaux à ceux que l'on peut obtenir en utilisant un système monopile. Ils se trouvent donc être une piste prometteuse pour répondre aux enjeux cités précédemment concernant.

### 1.3/ DÉFINITION DE L'ÉTUDE

Les systèmes PAC multiples n'ont pas encore été étudiés en profondeur à ce jour. En particulier, la gestion énergétique et le dimensionnement de ces systèmes est très peu



recensé parmi les publications scientifiques parues à ce jour. L'étude de l'impact de ces deux thématiques sur les performances des systèmes PAC multiples fera l'objet de cette thèse.

Ainsi, nous présenterons premièrement un état de l'art permettant d'appuyer le choix du sujet de thèse et de situer ces travaux par rapport aux autres travaux sur les systèmes PAC multiples. Les travaux de cette thèse étant majoritairement constitués de travaux de simulation il est nécessaire de modéliser les différents organes du systèmes PAC que nous souhaitons étudier. Ce modèle est présenté dans le troisième chapitre. Nous présenterons ensuite des résultats d'optimisation mettant en avant l'impact du dimensionnement et de la gestion énergétique sur le coût d'exploitation d'un système PAC multiple. Finalement, une proposition de gestion énergétique en ligne est présentée dans le chapitre 4.

#### 1.4/ DESCRIPTION DES LABORATOIRES D'ACCUEIL

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été menés en cotutelle entre deux universités : l'Université du Québec à Trois-Rivières et l'Université Bourgogne Franche-Comté et deux laboratoires : l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène et FEMTO-ST.

L'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH) est un laboratoire rattaché à l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). Il a été fondé au milieu des années 1990 dans le but de contribuer au développement des technologies de l'hydrogène. Pour cela, les équipes de recherche de l'IRH travaillent sur plusieurs sujets de recherche :

- Énergies renouvelables et gestion de la demande avec stockage d'électricité
- La mobilité électrique
- Les accumulateurs de chaleur pour augmenter l'efficacité énergétique de bâtiments
- Les nanostructures de carbone
- Valorisation de la biomasse

A ce jour les équipes de recherche de l'IRH comptent plus d'une cinquantaine de chercheurs dont 10 professeurs.



FIGURE 1.3 – Institut de Recherche sur l'Hydrogène

L'institut FEMTO-ST est rattaché à l'université Bourgogne Franche-Comté. Il a été fondé

le 1er janvier 2004 et était alors composé de la fusion de 5 laboratoires franc-comtois. A ce jour, l'institut est structuré en sept départements scientifique :

- Automatique et Systèmes Micro Mécatroniques (AS2M)
- Énergie
- Mécanique appliquée
- Micro Nano Sciences et Systèmes (MN2S)
- Optique
- Temps-Fréquence (TF)
- Département d'Informatique des Systèmes Complexes (DISC)

Les travaux de cette thèse ont été menés au sein du département Énergie et dans le cadre de la Fédération de Recherche FCLAB.

Le département ENERGIE focalise ses activités de recherche sur la conversion et la gestion de l'énergie. Il apporte ainsi une contribution scientifique majeure et complémentaire aux recherches menées au sein des six autres départements de FEMTO-ST à travers une approche énergétique systémique visant la production d'énergie efficiente, compétitive et respectueuse de l'environnement. Il compte environ 85 membres <sup>1</sup>.

La Fédération de Recherche FCLAB regroupe la totalité des équipes de recherche de Franche-Comté dans le domaine des systèmes pile à combustible. Au-delà du strict caractère régional, cette Fédération de Recherche présente également un caractère national, de par la présence de deux laboratoires associés à l'IFSTTAR au sein de celle-ci (ces deux laboratoires ayant également des personnels physiquement présents à Belfort), ainsi que par la présence du laboratoire AMPERE basé en région lyonnaise. L'effectif total de cette Fédération de Recherche est d'environ 120 personnes, dont 70 personnels permanents et 50 personnels sur contrats <sup>2</sup>.



FIGURE 1.4 – FCLAB

---

1. Plus d'informations sur <http://www.femto-st.fr/fr/Departements-de-recherche/ENERGIE/Presentation/>

2. Plus d'informations sur <http://www.fclab.fr/>



## ÉTAT DE L'ART ET DÉMARCHE SCIENTIFIQUE ADOPTÉE

La thématique de la gestion des systèmes PAC multi-pile étant encore peu étudiée, nous nous baserons sur une revue des méthodes de gestion adoptées dans le cadre du contrôle de systèmes redondants et de la gestion de systèmes multi-sources ou multi-actionneurs pour identifier une partie des enjeux majeurs que nous allons poursuivre au cours de cette thèse. Dans la suite du chapitre, nous présenterons une revue des travaux publiés sur les systèmes PAC multi-pile. En se basant sur ces revues, l'étude de la gestion énergétique semble être prometteuse et est un thème encore peu exploré. Finalement, nous présenterons les éléments de cadrage de la thèse avec la problématique traitée, les objectifs de la thèse, la méthodologie considérée pour mener ces travaux et l'organisation de ce document.

### 2.1/ SYSTÈMES MULTI-SOURCES - MULTI-ACTIONNEURS

La pile à combustible n'est pas le seul système à bénéficier de l'utilisation d'une architecture redondante. Nous présenterons dans cette section d'autres systèmes qui en bénéficient ainsi que les outils utilisés pour leurs gestions.

#### 2.1.1/ MOTORISATION ÉLECTRIQUE

Les travaux présentés dans [Yang et al., 2014] considèrent la gestion de la traction d'un véhicule tout-électrique. L'architecture de traction étudiée est constituée d'un groupe moteur à l'avant de 50kW et d'un groupe moteur arrière composé de deux moteurs roue pouvant développer chacun 28kW. La stratégie de contrôle proposée est basée sur la résolution d'un problème d'optimisation visant à minimiser la consommation de la chaîne de traction en temps réel lors du parcours d'un cycle NEDC. Il est montré que cette méthode de gestion permet d'obtenir un rendement global sur le cycle NEDC très proche de l'optimum global obtenu en utilisant la programmation dynamique (voir tableau 2.1).

Afin de comparer l'architecture proposée à d'autres architectures plus conventionnelles, d'autres architectures sont testées :

1. Un moteur de traction de 50 kW à l'avant et un moteur de traction de 50 kW à



TABLE 2.1 – Comparaison du rendement global entre l'optimisation en temps réel et l'optimisation globale)

Architecture	Cas 1	Cas 2	Cas 3
	(pente : 0%)	(pente : 5%)	(pente : 10%)
Optimum global hors ligne	92.69 %	92.17 %	93.19 %
Optimum local en temps réel	92.01 %	92.03 %	92.71 %

l'arrière.

## 2. Quatre moteurs-roues de 28 kW

Les résultats d'optimisation obtenus avec la programmation dynamique sont proposés dans le tableau 2.2 :

TABLE 2.2 – Comparaison du rendement global obtenu pour les différentes architectures (aucune valeur lorsque l'architecture ne permet pas d'effectuer le cycle)

Architecture	Cas 1	Cas 2	Cas 3
	(pente : 0%)	(pente : 5%)	(pente : 10%)
50 KW x 1, 28 kW x 2	92.69 %	92.17 %	93.19 %
50 KW x 2	81.6 %	88.2 %	-
28 KW x 4	86.1 %	-	-

On remarque que la première architecture proposée offre de meilleurs résultats que les autres. Cela est principalement dû à la complémentarité des moteurs utilisés. De plus, la redondance entraîne ici également une fiabilité accrue grâce à la possibilité de fonctionner en mode dégradé [Liu et al., 2012]. De plus, la distribution de la motorisation d'un véhicule apporte un avantage au niveau de l'implantation de celle-ci.

### 2.1.2/ BATTERIE

Les modules d'un pack batteries sont le plus souvent connectés via une configuration série. Cette configuration est certes la plus économique mais son utilisation peut entraîner des dysfonctionnements dus au déséquilibre de la charge ou de la décharge des modules lors du fonctionnement. Certains modules peuvent donc être soumis à une charge trop importante ou une décharge trop profonde. L'utilisation d'une configuration parallèle à travers des convertisseurs dédiés permet de s'affranchir de ce problème.

Encore une fois, la redondance du système offre plus de liberté au niveau du profil de charge imposé à chaque module. La stratégie de gestion proposée dans [Moo et al., 2008] impose une décharge intermittente à chacun des modules (voir figure 2.1). Ainsi certains modules se déchargent pendant que d'autres sont au repos. Les résultats présentés

annoncent alors une augmentation de la capacité effective par rapport au fonctionnement à charge constante. De plus cette stratégie permet d'évaluer plus précisément l'état de charge de chacun des modules durant les phases de repos en fonction de la tension à vide.

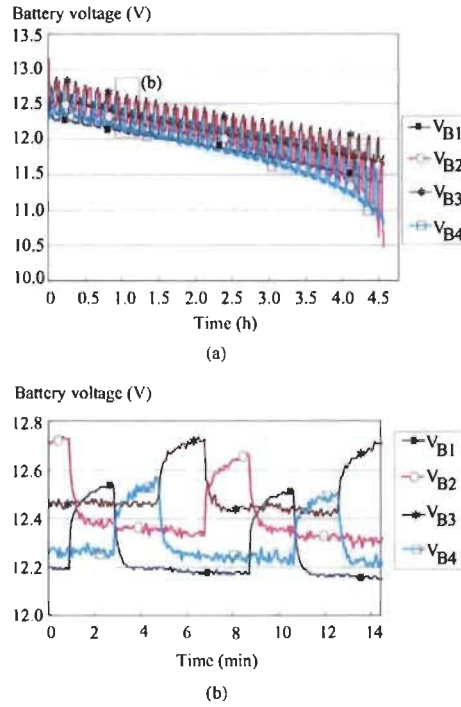


FIGURE 2.1 – Profil de tension en charge intermittente. (Extrait de [Moo et al., 2008])

Une seconde stratégie répartissant la puissance entre les différents modules dans le but de minimiser la vitesse de dégradation du système est proposée dans [Babazadeh et al., 2014]. Une modélisation de la dépendance de la vitesse de dégradation d'un module en fonction de la profondeur de décharge et du courant de décharge est proposée. En utilisant cette modélisation, la résolution du problème d'optimisation suivant permet d'obtenir la distribution minimisant la vitesse de dégradation :

$$\mathbf{P} = \arg \min_{\mathbf{P}} \sum_{i=1}^n P_i \cdot G(P_i) \cdot F(P_i) \quad (2.1)$$

sous contraintes :

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_{req} \quad (2.2)$$

$$\forall i = 1, n, -|P_i| \leq 0 \quad (2.3)$$

$$\forall i = 1, n, |P_i| - P_{i,ub} \leq 0 \quad (2.4)$$

où  $\mathbf{P}$  est un vecteur regroupant les puissances respectives auxquels les modules sont soumis,  $P_{req}$  est la demande en puissance et  $P_{i,ub}$  est la limite haute de puissance pour chaque module.

Une comparaison expérimentale entre cette stratégie de gestion et une stratégie de gestion plus répandue distribuant la puissance proportionnellement à la capacité de la batterie à été effectuée sur un système composé de 2 batteries identiques mais pour lequel l'état de charge de départ de l'une est de 50% alors que pour la seconde il est de 25%. Les résultats permettent d'observer un gain en durée de vie en faveur de la stratégie optimale proposée par l'auteur. Ce gain en durée de vie se traduisant par une réduction du coût d'exploitation du système de 12.5 %.

### 2.1.2.1/ DISCUSSION

La répartition de l'effort est une problématique récurrente dans le contrôle de système redondant. Une solution à cette problématique peut être trouvée dans la théorie de contrôle des systèmes redondants. Les méthodes de l'inverse généralisé et du daisy-chaining offrent une solution simple à implémenter. La méthode de l'inverse généralisé répartit l'effort entre les différents éléments du système en accordance avec le poids qui leur est attribué par le concepteur [Klein et al., 1983]. La méthode du daisy-chaining est une méthode séquentielle attribuant la totalité de l'effort à un élément jusqu'à ce que son maximum de fonctionnement soit atteint. Un autre élément est alors utilisé pour fournir l'effort et cela jusqu'à ce que la totalité des éléments soit utilisés ou jusqu'à ce que l'effort demandé soit fourni [Johansen et al., 2013]. Toutefois, les méthodes de distribution basées sur l'optimisation d'un critère sont un choix privilégié car elles permettent de profiter au maximum du potentiel dû à la redondance. Cependant ces méthodes nécessitent une connaissance a priori des éléments rentrant en jeu dans le processus d'optimisation. Entre autres, la dégradation d'une batterie ou d'une pile à combustible est un facteur pour lequel une modélisation précise n'est pas disponible. Il est alors nécessaire de se tourner vers une modélisation empirique. Néanmoins, celles-ci permettent d'obtenir de bons résultats pour les cas présentés.

## 2.2/ SYSTÈMES MULTI-PILE À COMBUSTIBLE

Les systèmes PAC multi-piles sont utilisés depuis 1981 [Reaves et al., ] dans l'aérospatial et depuis 2002 [Hammerschmidt, 2006] dans le cadre d'applications militaires sous-marines. Le monde universitaire s'est également penché sur l'étude de ces systèmes. Une étude bibliographique recensant les travaux de recherche sur les systèmes PAC multi-pile (publiée dans [Marx et al., 2014]). Elle indique que ces travaux traitent des cinq sujets suivants :

- Les architectures fluidiques et électriques.
- Les topologies de convertisseurs adaptées aux systèmes PAC multi-pile.
- L'influence de la gestion individuelle sur la puissance maximale du système.

- La distribution de la puissance
- Les capacités de fonctionnement en mode dégradé.

### 2.2.1/ ARCHITECTURES

Comme pour les systèmes PAC, le fonctionnement des systèmes PAC multi-piles requiert la présence d'auxiliaires d'apport en gaz, de contrôle de la température et d'adaptation de puissance. La redondance apportée par la multiplicité des piles permet d'adopter différentes architectures pour agencer et/ou mutualiser ces différents auxiliaires. Les systèmes PAC multi-piles peuvent être constitués soit de plusieurs piles à combustible, soit de la segmentation d'un stack simple (figure 2.2). Ces deux types de systèmes possèdent atouts et défauts.

Les systèmes segmentés ont la particularité d'être plus compacts car construits d'un seul bloc. Toutefois, dans ce cas seule l'architecture électrique est variable. Les architectures thermique et fluide sont imposées par celles du stack segmenté.

Cependant, les systèmes PAC multi-pile modulaires offrent plus de possibilités au niveau de l'occupation de l'espace à l'installation. L'aspect modulaire fait que pour certaines architectures, l'adaptation de la puissance maximale du système peut être réalisée par l'ajout ou le retrait de modules.

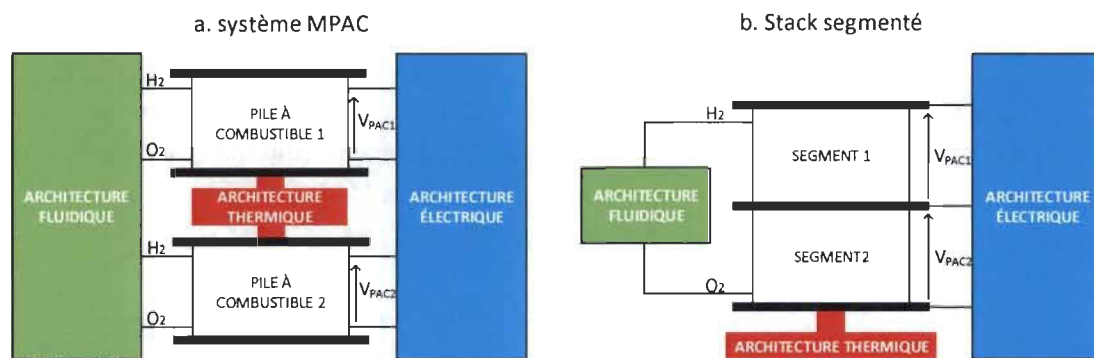


FIGURE 2.2 – Types de systèmes PAC multi-pile

La première sous-section sera consacrée aux architectures fluidiques et la deuxième sera consacrée aux architectures électriques. N'ayant pas été traité précédemment dans la littérature, l'impact de l'architecture thermique ne pourra donc pas être présenté dans cette partie relative à l'état de l'art.

#### 2.2.1.1/ ARCHITECTURE FLUIDIQUE

L'architecture fluide décrit la configuration adoptée par les sous-systèmes d'apport en réactifs. Plusieurs architectures pour des systèmes PAC multi-piles de technologie

SOFC ont été proposées et étudiées [Assabumrungrat et al., 2009]. Elles sont présentées en figure 2.3.

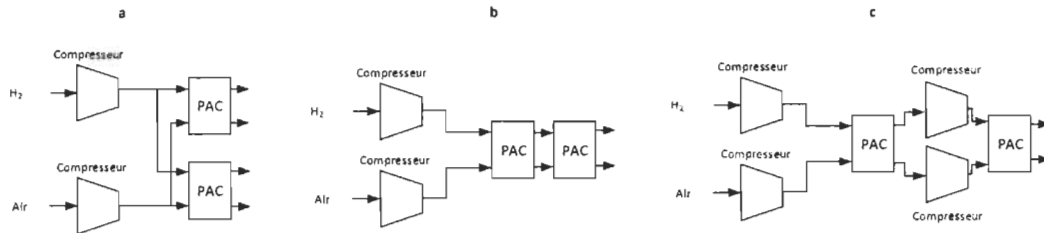
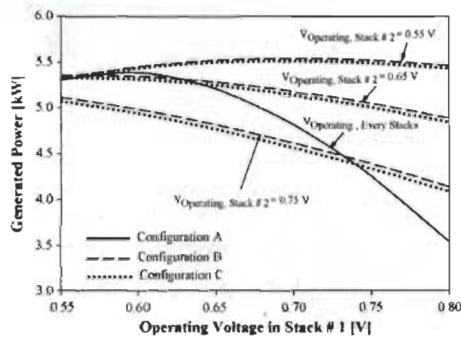


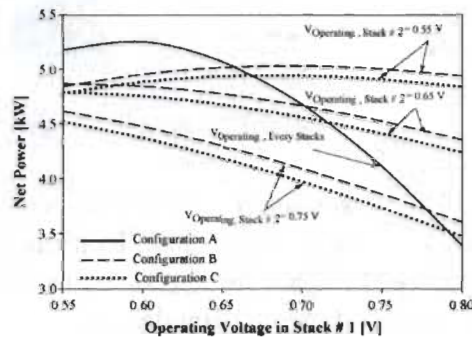
FIGURE 2.3 – Architectures fluidiques proposées dans [Assabumrungrat et al., 2009]

La configuration parallèle est présentée en figure 2.3.a. Deux variantes de la configuration série sont également proposées. La première, présentée en figure 2.3.b, possède une paire de compresseurs installées en amont du premier stack. La deuxième, présentée en figure 2.3.c, possède deux paires de compresseurs installées en amont du premier stack et entre le premier et le deuxième stack.

Ces architectures ont été étudiées en simulation et les résultats de simulation indiquent que la puissance générée par le système augmente, dans une certaine limite, avec le débit de réactif fourni aux piles [Song et al., 2000]. Toutefois, la chute de pression entre l'entrée et la sortie du stack augmente avec le débit et le courant débité par la pile [Pei et al., 2006]. De plus, une augmentation du débit de réactif entraîne également une augmentation de la puissance consommée par les compresseurs. L'utilisation de l'architecture série permet une génération de puissance brute plus importante (figure 2.4a). Cependant, c'est l'architecture parallèle qui propose une puissance nette plus importante (figure 2.4b).



(a)



(b)

FIGURE 2.4 – (a) Influence de la tension d'opération sur la puissance fournie [Assabumrungrat et al., 2009], (b) Influence de la tension d'opération sur la puissance nette [Assabumrungrat et al., 2009]



Comme proposé dans le brevet [Katz, 1991], d'autres possibilités ont été explorées sans imposer de restrictions vis-à-vis de la technologie utilisée. Trois architectures sont détaillées en figure 2.5. La première architecture fournit les piles en réactifs de manière homogène (figure 2.5.a). La deuxième architecture fournit les stacks 1 et 2 de façon homogène alors que le stack 3 reçoit l'échappement des stacks 1 et 2 (figure 2.5.b). La troisième architecture lie les circuit d'apport en réactif de chaque stack en série (figure 2.5.c). Dans le cas des configurations b et c, le flux d'hydrogène circulant dans les stacks en amont est plus important que celui circulant dans les stacks en aval. Le dimensionnement des circuits fluidiques des stacks seront donc différents selon leur position dans la chaîne.

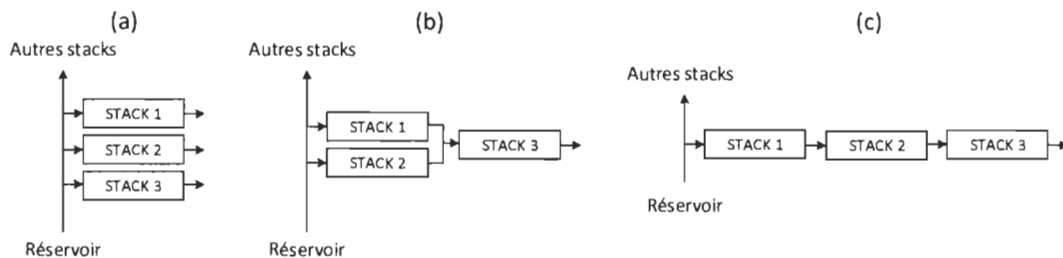


FIGURE 2.5 – Architectures fluidiques proposées par [Katz, 1991]

D'après [Katz, 1991], les deuxième et troisième configurations affichent les meilleures performances en termes de limitation de l'appauvrissement en réactif car la consommation des stacks en aval circule également par les stacks en amont. Cela permet de fournir un surplus de réactif aux stacks en amont et donc de fonctionner en sur-stœchiométrie. Dans les deux cas, le surplus en réactif imposée aux premiers stacks de l'architecture est plus important que celui de la première configuration. Entre ces deux configurations, c'est la deuxième qui est préférée car son compresseur requiert moins de puissance. La configuration série serait alors la plus fiable mais requiert également plus de puissance que la configuration parallèle. Toutefois, la problématique de l'assèchement de la membrane électrolytique n'est pas abordée par l'auteur alors que les configurations fluidiques proposées lui sont plus (série/série-parallèle) ou moins (parallèle) favorable.

### 2.2.1.2/ ARCHITECTURE ÉLECTRIQUE

L'architecture électrique décrit la configuration adoptée pour la liaison électrique des différents stacks du système. Certaines architectures peuvent être utilisées sans convertisseurs de puissance mais l'adaptation de tension et le contrôle du courant restent indispensables dans la plupart des cas. De plus, l'utilisation de convertisseurs de puissance élargit les possibilités des différentes associations [Frappe et al., 2010]. Ces différentes architectures possèdent des avantages et désavantages qui seront présentés dans les prochaines sections. Ici, le bus de distribution considéré est un bus DC. Ceci convient particulièrement aux architectures hybridées avec une batterie.

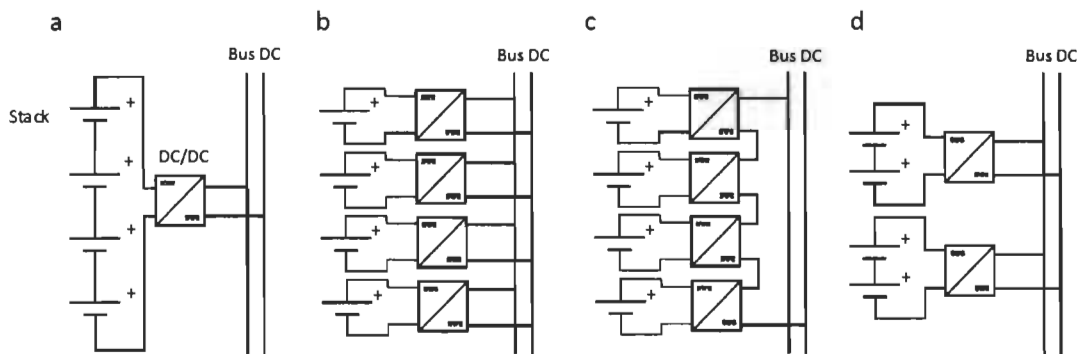


FIGURE 2.6 – Les configurations électriques d'adaptation de puissance pour systèmes PAC multi-pile

**Configuration série** Présenté en figure 2.6.a, l'architecture série impose une liaison électrique série entre les différents stacks. Un seul convertisseur de puissance est utilisé pour adapter la tension de l'ensemble à la tension de bus. Cette structure utilise un convertisseur de puissance à faible gain. Cela permet de limiter les pertes et les contraintes sur l'électronique de puissance. Toutefois, la simplicité de cette configuration est aussi une faiblesse. Le courant circulant dans les différents stacks et leur isolation ne peuvent pas être contrôlés individuellement et, sans circuit de dérivation, la défaillance d'un stack entraîne la défaillance du système dans sa totalité [Ozpineci et al., 2009].

**Configuration parallèle** Présenté en figure 2.6.b, chaque stack est relié au bus DC par un convertisseur de puissance. Cette architecture permet le contrôle du courant imposé à chaque stack et donc de son isolation. Toutefois, comme les piles à combustible sont des sources basse tension / fort courant, les convertisseurs de puissance utilisés pour cette architecture nécessitent un gain en tension important. Cela implique des pertes et contraintes plus importantes sur l'électronique de puissance durant les commutations [Zhao et al., 2011]. Finalement, les composants de stockage énergétique passif de ces convertisseurs sont plus coûteux que pour les autres configurations. Cela en fait la configuration électrique la plus coûteuse [De Bernardinis et al., 2008b].

**Configuration en cascade** Présentée en figure 2.6.c, chaque stack est associé à un convertisseur de puissance. Ces convertisseurs sont reliés en série au bus DC. Cette architecture permet le contrôle individuel des stacks. Toutefois, à la différence de l'architecture parallèle, la tension de bus est divisée entre chaque convertisseur. Cette division permet de réduire le stress sur les convertisseurs de puissance.

**Configuration série-parallèle** Présenté en figure 2.6.d, cette architecture mêle les configurations parallèle et série. Cette configuration équilibre les avantages et les inconvénients des deux configurations. Le ratio d'élévation de tension est plus faible que celui de l'association parallèle. Elle permet également un contrôle individuel de chaque

branche série. Cela en fait une architecture plus fiable<sup>1</sup> que l'association série.

### 2.2.2/ TOPOLOGIES DE CONVERTISSEUR DE PUISSANCE

Les convertisseurs ont un impact important sur le vieillissement des systèmes PAC [Wahdame et al., 2008]. Afin de profiter au mieux des spécificités des systèmes PAC multi-pile, des topologies de convertisseurs adaptés ont été étudiées. Deux types de convertisseurs dédiés aux systèmes PAC multi-pile ont été étudiés :

- Les topologies directes (DC/DC) (figure 2.6)
- Les topologies isolées avec transformateurs (DC/AC/DC) (figure 2.7)

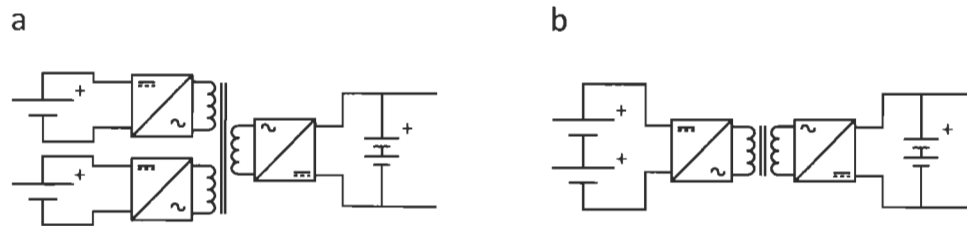


FIGURE 2.7 – Adaptation de puissance avec transformateurs

L'utilisation des transformateurs haute fréquence pour augmenter le ratio d'élévation de tension au sein des topologies DC/AC/DC rend la conception de ces convertisseurs plus flexible [Garnier et al., 2005] et réduit le volume et le poids du système grâce aux technologies planar [Gustin et al., 2007]. De plus, cette approche permet une isolation galvanique entre les stacks et le bus DC et plusieurs piles peuvent être reliées au bus DC par un transformateur disposant d'un primaire multiple [Garnier et al., 2006] (Figure 2.7.a). Les stacks segmentés ont besoin d'isolation entre l'entrée et la sortie des convertisseurs pour éviter la circulation de courants parasites [Palma et al., 2009]. Les topologies avec un étage intermédiaire alternatif haute fréquence sont donc les plus avantageuses pour ces systèmes [Hawke et al., 2011, De Bernardinis et al., 2012]. L'utilisation de topologies à plusieurs bras introduit une tolérance aux défauts additionnelle. En cas de défaut d'un des bras, les bras fonctionnels peuvent encore faire transiter une partie de la puissance [De Bernardinis et al., 2008b]. De plus ces topologies réduisent grandement les oscillations de courant au niveau de la PAC.

### 2.2.3/ IMPACT DE L'ARCHITECTURE SUR LA PUISSANCE MAXIMALE

Le contrôle individuel en courant que l'on obtient en utilisant certaines architectures permet de faire fonctionner chaque stack au point de fonctionnement désiré. Cette capacité permet d'obtenir un gain en puissance maximale des stack segmentés.

1. Ici, la fiabilité est définie comme la capacité à fonctionner en mode dégradé lorsqu'un défaut apparaît.



L'influence de l'architecture électrique sur la puissance en sortie d'un stack segmenté est présenté dans [Palma et al., 2009, Hawke et al., 2011]. Du fait du processus de fabrication actuel et de la non-homogénéité des variables physiques (température, concentration d'eau ...) au cœur de la pile, les différentes parties d'un stack segmenté ou les différents stacks d'un système PAC multi-pile n'affichent pas les mêmes performances. Afin de souligner ce phénomène, les figures 2.8a et 2.8b présentent les courbes de polarisation et de puissance de chaque segment d'un stack à trois segments. Sans contrôle individuel, les performances du système sont limitées par les performances du segment le moins performant.

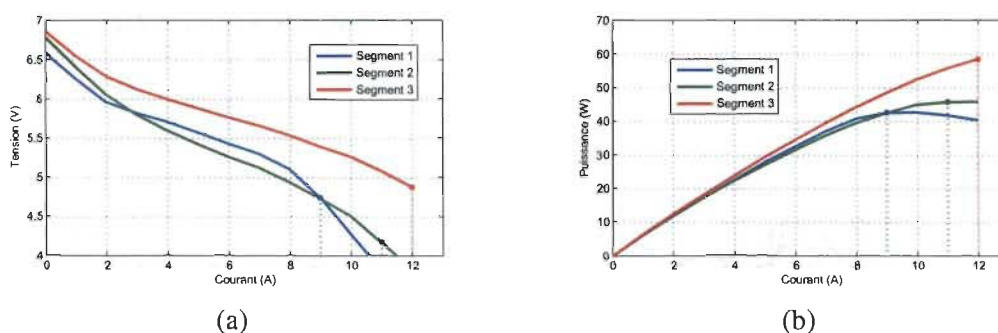


FIGURE 2.8 – (a) Courbe de polarisation adaptée de [Hawke et al., 2011], (b) Courbe de puissance adaptée de [Hawke et al., 2011]

La segmentation permet ici d'utiliser chaque segment à son maximum de puissance, les gains obtenus par cette utilisation sont présentés dans le tableau 2.3 [Palma et al., 2009]. Ces tendances sont également observables pour tout autre système PAC multi-pile disposant de contrôle individuel du courant.

TABLE 2.3 – Gain en puissance maximal obtenu grâce à l'architecture segmentée

<i>Segment</i>	<i>Gain</i>
Puissance du segment 1	0%
Puissance du segment 2	9.3 %
Puissance du segment 3	18.4 %
Puissance totale	9.7 %

## 2.2.4/ DISTRIBUTION DE LA PUISSANCE

L'utilisation de la configuration parallèle pour l'architecture électrique permet de distribuer la puissance entre les différentes piles à combustible du système. L'ensemble des solutions du problème de distribution de la puissance est de dimension égale au nombre de stack moins un. Il est donc nécessaire d'effectuer un choix parmi ces solutions. Pour se faire, les travaux présentés dans [Resmi Suresh et al., 2016] proposent une méthodologie basée sur la résolution du problème d'optimisation suivant :

$$\mathbf{I} = \arg \min_{\mathbf{I}} \sum_{i=1}^n I_i \quad (2.5)$$

sous contraintes :

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_{req} \quad (2.6)$$

$$\forall i = 1, n, I_{i,lb} - I_i \leq 0 \quad (2.7)$$

$$\forall i = 1, n, I_i - I_{i,ub} \leq 0 \quad (2.8)$$

où  $\mathbf{I}$  est un vecteur regroupant les intensités respectives auxquelles les stacks sont soumis,  $P_{req}$  est la demande en puissance et  $I_{i,lb}$  (respectivement  $I_{i,ub}$ ) est la limite basse (respectivement limite haute) de courant pour chaque stack.

L'outil de résolution analytique utilisé ici fait intervenir les équations de Lagrange et les conditions d'optimalité de Karush-Kuhn-Tucker. D'après les résultats présentés, l'utilisation de cet outil permet de réduire considérablement le temps d'exécution par rapport au temps d'exécution obtenu en utilisant un algorithme d'optimisation numérique. Cela permet d'implémenter cette solution en temps réel alors qu'il est peu envisageable de le faire en utilisant une solution numérique (temps d'exécution rapporté : 2 ms- analytique / 100 ms - numérique).

Toutefois, même si la méthode de résolution proposée est performante, la minimisation du courant ne présente que peu d'intérêt par rapport à d'autres objectifs tels que la minimisation de la consommation ou de la dégradation et la résolution proposée suppose le rendement des auxiliaires des systèmes PAC constant or ce rendement varie fortement sur la plage de fonctionnement du système. Cette hypothèse limite donc l'utilité des travaux présentés.

### 2.2.5/ MODES DÉGRADÉS

La fiabilité du système PAC est un des facteurs qui doit être amélioré afin de rendre le système plus compétitif. Les systèmes PAC multi-pile affichent une redondance plus élevée que les systèmes à stack unique. Cette redondance peut être utilisée pour permettre un fonctionnement en mode dégradé en cas de défaut et éviter la panne complète du système.

Les défauts interviennent plus souvent au niveau du convertisseur de puissance mais peuvent aussi apparaître au niveau du stack. Les défauts les plus fréquents au niveau de la pile à combustible sont l'assèchement, le noyage et l'empoisonnement des cellules. La

segmentation des stacks permet également de détecter plus efficacement certains défauts (assèchement et noyage d'un segment).

L'association série est la moins coûteuse mais aussi la moins fiable dans sa version basique. En plaçant une diode en anti-parallèle de chaque stack et un interrupteur pour déconnecter les stacks dégradés (figure 2.9a), les stacks en défaut peuvent être isolés. Le système peut alors encore fournir une partie de la charge en cas de défaut [De Bernardinis et al., 2008a]. La déconnexion et la reconnexion d'un stack ont été simulées dans [Frappe et al., 2010]. Les résultats de simulation indiquent que la déconnexion n'endommage pas les stacks en bonne santé. Toutefois, après récupération du stack, un redémarrage brutal (fermeture de l'interrupteur correspondant pendant l'utilisation) pourrait entraîner des pics de courant qui endommageraient le stack reconnecté. Un redémarrage doux (reconnexion du stack après l'arrêt du système) est alors nécessaire. Ce type de redémarrage pourrait toutefois ne pas être acceptable pour certaines applications.

Comme présenté en figure 2.9b, une variante de cette solution peut être adaptée aux systèmes segmentés. La dérivation ne peut toutefois qu'être envisagée uniquement en dérivant la totalité des segments en partant d'une extrémité.

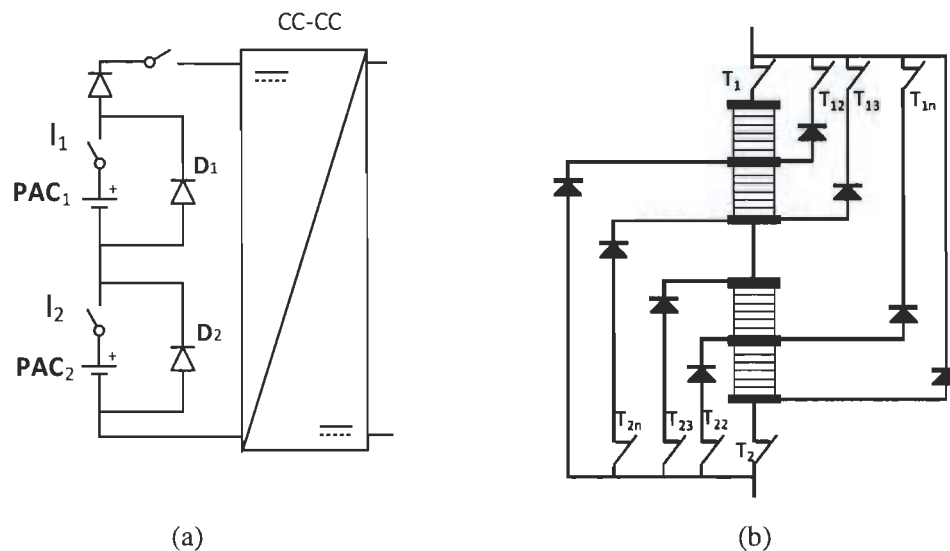


FIGURE 2.9 – Dérivation par diodes : (a) architectures série, (b) stack segmenté [Frappe, 2012]

Les topologies parallèle et en cascade utilisent des convertisseurs pour contrôler les différentes piles individuellement. Avec plus de degrés de liberté, le fonctionnement en mode dégradé est plus facilement envisageable. Après la récupération des piles dégradées, le système peut reprendre un fonctionnement normal progressivement grâce à la distribution de puissance entre les différents stacks [Ozpineci et al., 2004].

La fiabilité du système passe également par les convertisseurs, ils se doivent d'être fiables. Les topologies de convertisseur à plusieurs bras proposent une fiabilité accrue [De Bernardinis et al., 2008b]. Leur capacité de réduction de l'oscillation du courant d'entrée est également remarquable.

### 2.2.6/ DISTRIBUTION DES THÈMES DE RECHERCHE ET DISCUSSION

Les systèmes PAC sont très coûteux. Les systèmes multi-pile à combustible le sont encore plus. Les travaux expérimentaux requièrent des installations hydrogène et de façon globale une expertise importante sur les systèmes PAC. Pour ces raisons, les travaux sur les systèmes multi-PAC sont encore peu nombreux. A ce jour, la recherche sur les systèmes PAC multi-pile a porté en grande partie sur les topologies de convertisseurs pour système PAC multi-pile, l'influence des architectures fluide et électrique ainsi que le fonctionnement en mode dégradé. De plus, une grande partie de ces travaux s'est concentrés sur la thématique de la fiabilité. Les thématiques du rendement énergétique, du vieillissement ne sont que très légèrement introduites.

La répartition des thèmes abordés par les articles cités dans ce chapitre est donnée dans le tableau 2.4.

TABLE 2.4 – Thématiques abordées par les 21 travaux de l'étude

Catégories	Distribution	Ratio
Influence de la configuration fluide sur la puissance électrique	1	3.3 %
Influence de la configuration électrique sur la puissance électrique	2	6.7 %
Fonctionnement en mode dégradé	5	16.7 %
Architectures pour systèmes multi-PAC	8	26.7 %
Architectures de conversion de puissance pour systèmes multi-PAC	8	26.7 %
Hybridation de système multi-PAC	3	10 %
Contrôle/gestion énergétique des systèmes multi-PAC	2	6.7 %
Détection de défaut	1	3.3 %

Le contrôle des systèmes PAC multi-pile est très peu abordé par la communauté bien que les travaux déjà effectués soient prometteurs. De plus, la gestion énergétique des système PAC multi-pile n'a pas encore été abordé en dehors de cette thèse. Étant un facteur à fort impact sur d'autres systèmes hybridés et peu explorée dans le cas des systèmes PAC multi-piles, la gestion énergétique sera au cœur de ces travaux de thèse.

### 2.3/ CONTRÔLE DES SYSTÈMES REDONDANTS

Les systèmes PAC multi-piles peuvent être considérés comme des systèmes redondants. Étant privilégiés dans plusieurs secteurs comme l'aéronautique, l'aérospatiale ou le mari-

time militaire, les systèmes redondants et leur contrôle en particulier ont déjà fait l'objet d'études approfondies. Il est donc intéressant de s'inspirer des travaux sur le contrôle des systèmes redondants pour s'attaquer à la problématique de la gestion énergétique des systèmes PAC multi-piles.

### 2.3.1/ MÉTHODES DE RÉPARTITION DE L'EFFORT

La problématique associée au contrôle des systèmes redondants est celle de la répartition de l'effort. Dans le cadre d'un système composé de  $n$  systèmes PAC où l'effort est la puissance à fournir par la totalité du système  $P_{sys}$ , la formulation du problème de répartition est la suivante :

$$\mathbf{P} = \mathbf{k} P_{sys}, \text{ où } \mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{pmatrix} \text{ et } \mathbf{k} = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Le vecteur  $P$  regroupe les puissances fournies par les  $n$  modules PAC composant le système multi-stack. Il est donc ici question de déterminer le vecteur  $k$  qui régit la répartition de la puissance. Dans le cadre du système PAC multi-pile, le vecteur  $k$  est contraint par les équations suivantes :

$$\forall i \in \{1, n\}, 0 \leq k_i \leq 1 \quad (2.10)$$

$$\sum_{i=1}^n k_i = 1 \quad (2.11)$$

D'après cette formulation du problème de répartition de la puissance, il est évident que la solution n'est pas unique. Afin de déterminer la solution choisie, plusieurs méthodes ont été conçues dans le cadre de la théorie du contrôle des systèmes redondants [Bordignon, 1996, Oppenheimer et al., 2006]. Trois de ces méthodes sont présentées dans la suite de cette section.

#### 2.3.1.1/ MÉTHODE DE L'INVERSE GÉNÉRALISÉ

La méthode de l'inverse généralisé dans sa forme la plus simple (lorsque l'on accorde le même poids à chacun des effecteurs) impose le vecteur de répartition  $\mathbf{k}$  suivant :

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} 1/n \\ 1/n \\ \vdots \\ 1/n \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

La demande de puissance est ici répartie de façon égale entre les différents systèmes PAC.

#### 2.3.1.2/ MÉTHODE DU "DAISY-CHAINING"

La méthode du "daisy-chaining" requiert une classification hiérarchique des effecteurs par groupe. Le principe de fonctionnement dicté par cette méthode impose que lorsqu'un des groupes sature ou qu'un défaut est détecté, un autre groupe est utilisé pour atteindre la commande désirée. Lorsqu'un nouveau groupe est démarré, il est géré grâce à la méthode de l'inverse généralisé jusqu'à sa saturation. Ainsi, dans le cadre d'un système multi-stack et si on considère que chacun des systèmes PAC compose un groupe d'effecteur, le daisy-chaining fonctionne comme suit : la première pile du groupe fournit toute la puissance jusqu'à ce que celle-ci dépasse sa puissance maximale. La deuxième pile est démarrée et fournit le reste de la puissance jusqu'à saturation et ainsi de suite jusqu'à ce que la demande de puissance soit respectée ou que toutes les piles soient saturées :

Si la pile 1 fonctionne à sa puissance maximale :

$$P_2 = P_{tot} - P_{1,max} \quad (2.13)$$

Si la pile 2 fonctionne à sa puissance maximale :

$$P_3 = P_{tot} - P_{2,max} - P_{1,max} \quad (2.14)$$

Si la pile m fonctionne à sa puissance maximale :

$$P_{m+1} = P_{tot} - \sum_{i=1}^m P_{i,max} \quad (2.15)$$

La figure 2.10 est une représentation graphique de cette méthode.

#### 2.3.1.3/ MÉTHODE OPTIMALE

La méthode de répartition optimale permet de fournir le vecteur de répartition **k** optimal vis-à-vis d'un problème d'optimisation comme celui présenté dans la section 2.2.4 [Härkegård et al., 2005]. Le comportement de la méthode de répartition de la puissance est alors entièrement dépendant du problème d'optimisation choisi.

#### 2.3.1.4/ COMPARAISON DU RENDEMENT EN CONDITION EXPÉRIMENTALE

Ces trois méthodes de distribution ont été comparées expérimentalement sur le banc de test PAC multipile de l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène. Ce banc est l'un des premiers banc multipile au monde. Il est composé des éléments suivants :



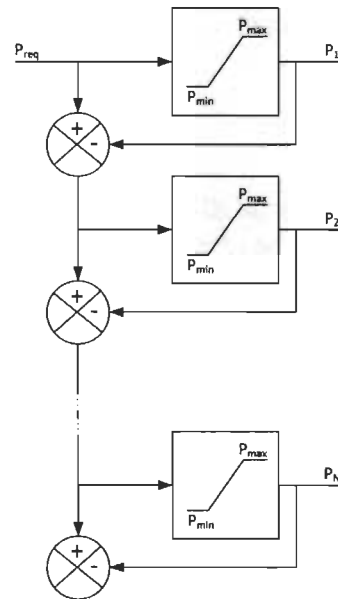


FIGURE 2.10 – distribution daisy-chain

- 4 piles à combustible atmosphériques - modèle H-500 de HORIZON
- 4 convertisseurs DC/DC - modèle DC15036-SU de Zahn Electronics
- 6 batteries 12V plomb acide - Tension de bus nominale de 72V
- 1 source électronique variable
- 1 charge électronique variable

La source et la charge permettent d'émuler le comportement en charge ou freinage récupératif du véhicule. Le banc est totalement instrumenté (tension, courant, débit, pression, humidité et température). Le schéma présenté en figure 2.11 définit l'architecture du banc de test PAC multi-pile.

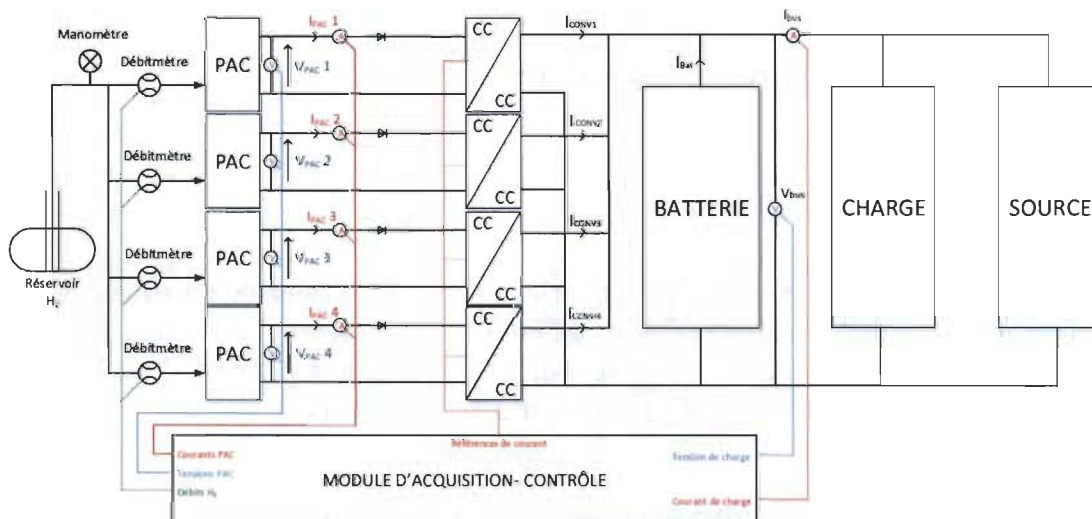


FIGURE 2.11 – Banc de test multi-pile

Les courbes de rendement en fonction de la puissance pour chaque méthode de distribu-

tion ont été obtenus expérimentalement et sont présentés en figure 2.12. Le rendement considéré ici est le rendement global de la conversion électro-chimique et ne prends pas en compte la consommation des auxiliaires.

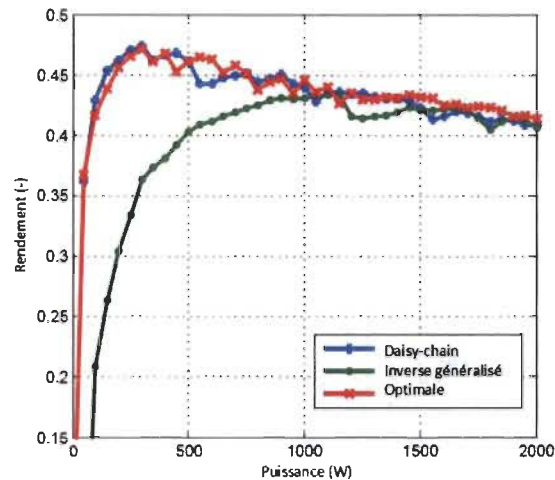


FIGURE 2.12 – Comparaison du rendement obtenu expérimentalement avec les trois méthodes de distribution

La stratégie optimale permet d'obtenir un rendement plus élevé qu'avec les autres stratégies. La méthode daisy-chain offre des performances proche de la méthode optimale. La méthode de l'inverse généralisé affiche les performances qu'un système monopile pourrait obtenir. A basse puissance, on observe un gain important en rendement des méthodes optimale et daisy chain par rapport à la méthode de l'inverse généralisé. Toutefois, ce gain devient inexistant à haute puissance. En considérant la consommation des auxiliaires dans le rendement global(Figure 2.13), les résultats théoriques ne changent pas fondamentalement.

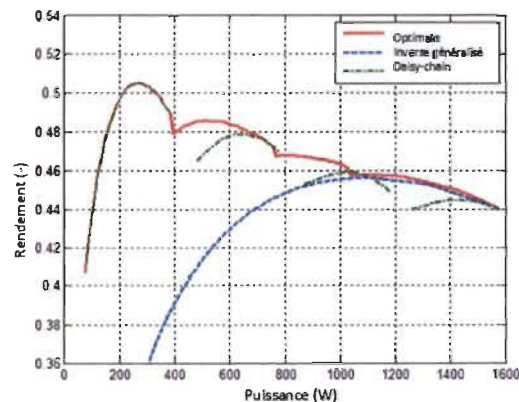


FIGURE 2.13 – Comparaison du rendement obtenu théoriquement avec les trois méthodes de distribution



## 2.3.1.5/ DISCUSSION

Les deux premières méthodes de distribution de la puissance possèdent plusieurs avantages. La méthode de l'inverse généralisé permet de distribuer la dégradation de façon égale entre chaque pile. La distribution daisy-chain permet d'utiliser le nombre minimal de piles pour atteindre la puissance désirée. Cette méthode permet donc de limiter la part de la dégradation due au démarrage des piles à combustible. De plus, ces deux méthodes peuvent fonctionner en ligne car elles ne nécessitent pas de calculs lourds. Ces méthodes n'ont toutefois pas été conçues afin d'agir sur la consommation ou le vieillissement du système. La méthode de répartition optimale permettrait alors de considérer ces problématiques.

## 2.4/ PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

Le contexte environnemental actuel et la localisation des énergies fossiles ont favorisé la mise en avant des énergies renouvelables. Le secteur du transport, étant un des acteurs majeurs de la consommation énergétique, n'y échappe pas.

L'intégration des énergies renouvelables dans le secteur du transport passe principalement par l'électrification de la chaîne de traction. Parmi les alternatives électriques considérées, le véhicule hydrogène - pile à combustible semble prometteur. Toutefois, l'industrialisation de cette alternative est limitée par plusieurs facteurs. Le facteur prédominant est le coût du système pile à combustible. A l'heure actuelle, il est trop élevé pour pouvoir faire concurrence au moteur à combustion interne ou à certaines alternatives renouvelables. Le deuxième facteur limitant est la durée de vie de la pile à combustible. Finalement, le troisième frein est l'acceptation sociétale des technologies de l'hydrogène.

Les systèmes PAC multi-pile proposent une alternative à la conception traditionnelle d'un système PAC. La tolérance aux défauts des systèmes PAC multi-pile a fait l'objet de plusieurs études ayant prouvé leur valeur. Toutefois, la plupart des systèmes étudiés ont adopté la configuration série. La configuration parallèle modulaire offre néanmoins plusieurs avantages. L'utilisation de systèmes modulaires simplifie la conception de système de puissances différentes. En effet, il suffit de faire varier le nombre de modules afin de modifier la puissance maximale du système. De plus, la variété des applications automobiles et de leurs conditions d'opérations semblent être un atout à l'utilisation de systèmes modulaires et adaptatifs. La configuration modulaire est dans ce cas la plus adaptée car elle offre la plus grande capacité d'adaptation.

Comme pour les systèmes PAC, les systèmes PAC multi-pile bénéficient grandement d'une hybridation avec des éléments de stockage énergétique tels que les supercondensateurs ou les batteries. L'hybridation est favorisée par des considérations énergétiques et de vieillissement.

Le vieillissement d'une pile à combustible PEMFC est relié à un grand nombre de phénomènes qui peuvent être réversibles ou non. On peut noter parmi les plus importants les impuretés, la dissolution des matériaux utilisés, les vibrations, l'humidité et la température. Il est possible de relier ces phénomènes de dégradation au profil d'utilisation de la pile à combustible. Ainsi, fonctionner à fort ou faible potentiel (respectivement faible ou fort courant) entraîne une accélération de la dissolution des matériaux. Les fortes variations de courant vont entraîner, en plus d'une accélération de la dissolution des matériaux, une dégradation de la membrane. Le profil de courant imposé est donc très influent sur la dégradation du système. De plus, le démarrage et l'arrêt du système entraîne donc une forte dégradation du fait des procédures utilisées actuellement.

Le degré de liberté supplémentaire offert par l'hybridation d'un système PAC multi-pile permet d'être plus flexible vis-à-vis du profil de puissance que l'on impose à cette dernière. Une grande partie de la dégradation est influencée par le profil de puissance imposé. Ainsi, un profil assurant des dynamiques de courant plus faible et des valeurs de tension "moyenne" permettra de réduire la vitesse d'agglomération du platine du platine et du support carboné. D'un point de vue énergétique, le rendement d'une pile à combustible est très dépendant du point de fonctionnement, ainsi la liberté supplémentaire offerte par l'hybridation peut permettre de fonctionner dans une plage de puissance où le rendement de la pile est plus élevé et donc de réduire la consommation d'hydrogène.

Les systèmes de stockage énergétiques préférés pour être associés à la pile à combustible sont les batteries et les super-condensateurs. Ils sont moins sensibles aux fortes dynamiques de courant que ne l'est la pile à combustible. Les super-condensateurs possèdent une densité énergétique plus faible que les batteries mais ils offrent une densité de puissance plus élevée. La solution d'hybridation privilégiée pour les applications au transport est la batterie. En effet, la densité énergétique plus importante qu'offre les batteries contraint de façon plus faible le profil de puissance que ne le ferait les super-condensateurs à puissance égale. C'est pourquoi, au cours des travaux présentés dans ce manuscrit, l'élément de stockage énergétique considéré pour l'hybridation du système est la batterie.

L'ajout d'un système de stockage énergétique à un système PAC multi-pile offre un degré de liberté supplémentaire pour la gestion et le dimensionnement du système. Il est également nécessaire pour le freinage régénératif dans le cadre d'une application aux transports. Celui-ci permet de réduire les contraintes de fonctionnement en lien avec la fourniture de la charge et donc de choisir un point de fonctionnement avantageux vis-à-vis du rendement et/ou de la dégradation. Toutefois, l'ajout des contraintes de fonctionnement de la batterie complique également la conception d'une stratégie de gestion.

La problématique soulevée par ces derniers paragraphes et qui sera étudiée au cours de cette thèse est la suivante :

*Dans le cadre d'une application automobile, quelle influence possède la gestion*

***énergétique sur les performances des systèmes hybrides PAC multi-pile - batterie par rapport aux systèmes hybrides PAC-batterie conventionnels en termes de durée de vie et d'efficacité énergétique ?***

## 2.5/ OBJECTIFS DE RECHERCHE

La conception de la gestion énergétique en ligne d'un système relève de la subjectivité du concepteur. Ainsi, afin d'obtenir une comparaison objective vis-à-vis de critères énergétiques et de durée de vie, il est nécessaire d'étudier des résultats de gestion énergétique optimaux. Le premier objectif est donc :

***Dans le cadre d'une application automobile et d'une hybridation avec une batterie, mettre en évidence les avantages et inconvénients des systèmes PAC multi-piles vis à vis des systèmes PAC classique sur la base d'une comparaison objective des performances basée sur des résultats d'optimisation.***

Les résultats d'optimisation sont obtenus hors ligne, il est donc nécessaire de concevoir une stratégie de gestion énergétique en ligne afin de visualiser l'écart entre le comportement optimal et le comportement en ligne. Le deuxième objectif est donc :

***Concevoir une stratégie de gestion énergétique en ligne pour système PAC multi-pile modulaire hybridé avec une batterie.***

L'optimisation expérimentale étant un processus très coûteux temporellement et financièrement, nous effectuerons cette optimisation en se basant sur un outil de simulation.

Les contributions secondaires associées à ces objectifs de recherche sont les suivantes :

- La proposition d'un modèle de pile à combustible à cathode ouverte adapté à l'évaluation de stratégies de gestion tant du point de vue vieillissement qu'énergétique.
- Des éclaircissements sur l'influence du dimensionnement d'un système hybride PAC multi-pile - batterie sur sa gestion optimale et sur les avantages en terme d'efficacité énergétique et de vieillissement obtenus par rapport au système hybride PAC - batterie équivalent.

## 2.6/ MÉTHODOLOGIE

Les travaux présentés dans ce manuscrit étant majoritairement des travaux de simulation, il est nécessaire de développer un modèle du fonctionnement du système simulé. En se basant sur un modèle existant, nous modéliserons les spécificités d'une pile à cathode ouverte. Le comportement en simulation sera ensuite validé expérimentalement sur le

banc de test présent à l'IRH.

Ce modèle sera utilisé par la suite pour obtenir des résultats d'optimisation et évaluer la stratégie de gestion conçue. Les résultats d'un processus d'optimisation sont principalement liés à la définition du problème d'optimisation résolu mais sont également dépendant de la méthode de résolution choisie. Différentes méthodes d'optimisation seront considérées et la plus adaptée vis-à-vis de la précision du résultat et du temps de calcul sera choisie.

Afin de proposer une gestion énergétique en ligne adaptée, une revue de l'existant sera effectuée. En se basant sur l'existant il s'agira alors de proposer une stratégie adaptée au système et permettant d'obtenir un comportement proche de celui obtenu par l'optimisation.

Finalement, les travaux d'optimisation et de conception de la gestion énergétique sont orientés vers une application automobile qu'il faudra caractériser. Le profil de mission automobile et le type de véhicule sont les variables influant le plus sur la caractérisation de l'application. Ils seront donc choisis afin de refléter une majorité des profils d'utilisation que l'on peut observer dans le secteur de l'automobile. Cela permettra d'assurer des résultats plus objectifs.

## 2.7/ ORGANISATION DE LA THÈSE

Ce document possède 3 chapitres en plus de celui-ci. La première partie présente les travaux de modélisation réalisés. Le système étant composé de systèmes PAC et d'un pack batterie. Les deux sont modélisés et pour chacun la modélisation traite le comportement énergétique et sa dégradation.

La deuxième partie présente la comparaison de la gestion énergétique optimale du système hybride PAC multi-pile - batterie et celle du système hybride PAC - batterie. Cette partie débute par la présentation du problème d'optimisation. Ensuite, le choix de la méthode d'optimisation est justifié. Finalement les résultats d'optimisation sont présentés et critiqués.

La troisième partie présente les travaux de conception de la stratégie de gestion énergétique en ligne proposée. La stratégie énergétique conçue est présentée, suivie par son évaluation en simulation. Finalement, la problématique de la co-conception de la gestion énergétique et du dimensionnement est introduite.



# II

## CONTRIBUTION



## MODÉLISATION

Les modèles du système PAC et de la batterie que nous utilisons dans la suite des travaux décrits dans ce manuscrit sont présentés dans ce chapitre. Afin d'être dans la possibilité d'obtenir une validation expérimentale du modèle présenté dans ce chapitre, les éléments modélisés seront ceux du banc d'essais expérimentaux présent à l'IRH. Ainsi, certaines hypothèses prises en compte dans la modélisation ont été imposées par les technologies utilisées sur le banc de test multi-pile de l'IRH. Nous présenterons premièrement le banc de test de l'IRH, puis la modélisation du comportement énergétique des systèmes pile à combustible et de la batterie. Finalement, nous terminerons sur la modélisation du vieillissement de ces deux organes.

### 3.1/ BANC DE TEST MULTI-PILE À COMBUSTIBLE

Le banc de test multi-pile de l'institut de recherche sur l'hydrogène a été conçu afin de pouvoir remplacer le système PAC embarqué sur le véhicule hybride PAC Némoto présenté en figure 3.1.



FIGURE 3.1 – Némoto

Ce véhicule basse-vitesse sert de plate-forme de test et permet d'expérimenter des algorithmes de gestion énergétique en conditions réelles. La figure 3.2 présente l'architecture



du système énergétique embarquée dans le véhicule.

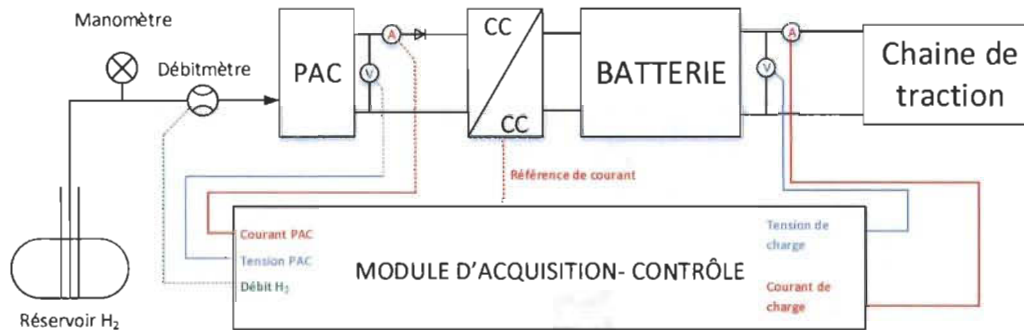


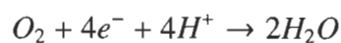
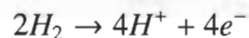
FIGURE 3.2 – Architecture électrique du Némio

A la base, ce véhicule fourni en énergie uniquement par ses batteries, a été couplé à une pile à combustible agissant en tant que "range-extend" <sup>1</sup> pour pallier la faible capacité énergétique des batteries. Le système hybride PAC multi-pile - batterie présenté dans le chapitre précédent remplaçant le système assurant la fourniture de puissance au véhicule aura le même dimensionnement que ce dernier.

### 3.2/ PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA PILE À COMBUSTIBLE

La pile à combustible à membrane échangeuse de protons est un convertisseur électrochimique. Elle permet de produire de l'électricité et de l'eau à partir de dihydrogène et de dioxygène. La pile à combustible est formée par un empilement de cellules. Ces cellules sont constituées d'une membrane sur laquelle sont déposées des électrodes assurant la réaction de l'hydrogène et de l'oxygène, de plaques bipolaires permettant d'acheminer les réactifs et le liquide de refroidissement et d'une couche de diffusion assurant une répartition plus homogène des réactif sur les électrodes. Cette structure est présenté en figure 3.3.

La pile à combustible convertit le dihydrogène et le dioxygène en électricité par l'intermédiaire de la réaction d'oxydo-réduction suivante :



1. La pile à combustible fournit de l'énergie à la batterie afin d'augmenter l'autonomie du système.

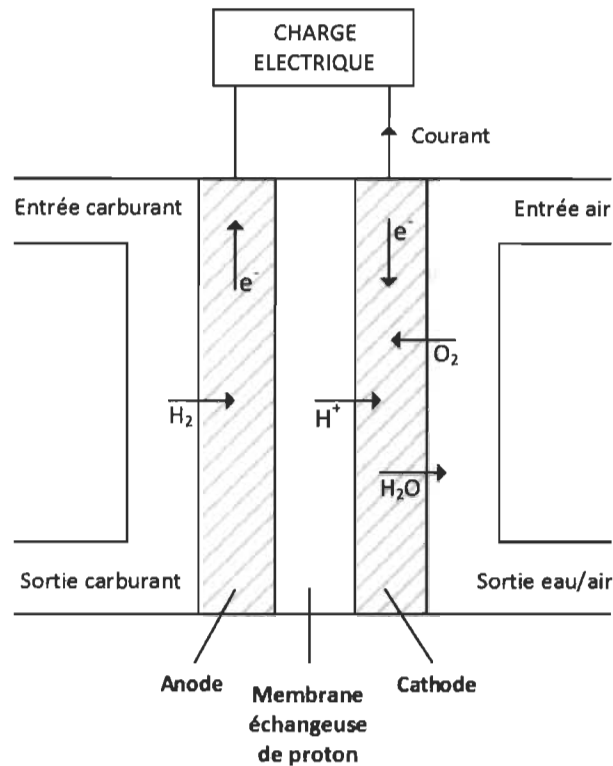


FIGURE 3.3 – Structure d'une cellule de pile à combustible

### 3.3/ COMPORTEMENT ÉNERGÉTIQUE

Le comportement énergétique d'une pile à combustible dépend fortement de la technologie employée, des éléments composant<sup>2</sup> le stack et de ses auxiliaires. Ces derniers, déjà présentés dans l'introduction, régissent l'apport en réactif, la température et la conversion de puissance. Ces éléments seront modélisés afin de prendre en compte l'influence des auxiliaires sur le comportement énergétique.

Les piles du banc de test sont de type atmosphérique. L'apport en oxygène est donc réalisé à pression atmosphérique à l'aide de ventilateurs. Ces ventilateurs réalisent également le contrôle en température du système. Le stack est donc accompagné d'un ventilateur et d'un convertisseur de puissance optionnel.

La représentation énergétique macroscopique (REM)<sup>3</sup> est adoptée pour la modélisation du système. Cet outil de modélisation permet de représenter de manière graphique les interactions multiphysiques entre les éléments du système et nous permet donc de les mettre en valeurs dans le cadre de ce modèle<sup>4</sup>. De plus cette modélisation modulaire est

2. Ici, nous faisons références aux matériaux et technologies mises en oeuvre dans la réalisation du stack

3. La représentation énergétique macroscopique est présentée plus en détail sur le site web dédié <http://www.emrwebsite.org>.

4. La REM impose une modélisation utilisant la causalité intégrale et donc des entrées/sorties fixes. Cela facilite l'échange de modèle de modèle au sein d'une équipe de recherche.

très facilement réutilisable et sera donc facilement valorisable dans nos futurs travaux.

Les différentes variables intervenant dans ce modèle sont présentées dans la nomenclature présente dans le préambule.

### 3.3.1/ STACK

Cette partie du modèle permet de déterminer la température, la tension de sortie et les quantités de réactifs consommées par la réaction en fonction du courant débité par la pile, des pressions et du débit d'air imposé par le ventilateur. Les modèles de PEMFC varient en fonction de leur application. Le choix considéré ici a été de reprendre des travaux effectués précédemment par l'équipe encadrant la thèse. Ainsi ce travail s'inscrit dans la continuité de travaux effectués à l'IRH et FEMTO-ST. La modélisation du fonctionnement électrochimique est basée en partie sur les travaux de [Boulon, 2009]. La modélisation du comportement en température est basée sur les travaux de [Higueta Cano et al., 2014].

Des modifications ont été apportées à ces travaux afin que le modèle présenté ici soit représentatif du système présent sur le banc de test. Ces modifications ont aussi pour but d'adapter le modèle aux besoins des travaux présentés dans les sections suivantes. L'accent est donc placé sur la modélisation du comportement énergétique et du vieillissement.

#### 3.3.1.1/ ÉLECTROCHIMIE

Les équations suivantes permettent de définir la tension de sortie du stack en fonction de la température, des pressions et du courant débité par la pile. La tension de sortie du stack possède un comportement dynamique. On considérera qu'elle est constituée d'une partie statique et d'une partie dynamique (équation (3.1)). Les développements suivants supposent que les tensions de cellule, la température et les pressions sont uniformes. On peut donc calculer la tension de stack en multipliant la tension de cellule par le nombre de cellules.

$$V_{PAC} = N_{cell} (V_{cell,s} + V_{cell,d}) \quad (3.1)$$

Où  $V_{PAC}$  est le potentiel aux bornes du stack,  $N_{cell}$  est le nombre de cellule du stack,  $V_{cell,s}$  et  $V_{cell,d}$  sont les parties statique et dynamique du potentiel de la cellule.

La partie statique du potentiel de cellule est calculée en soustrayant au potentiel de Nernst les surtensions ohmiques, d'activation et de concentration [Barbir, 2013].

$$V_{cell,s} = E_n - \Delta V_{act} - \Delta V_{conc} - \Delta V_{ohm} \quad (3.2)$$

Où  $E_n$  est le potentiel de Nernst,  $\Delta V_{act}$ ,  $\Delta V_{conc}$  et  $\Delta V_{ohm}$  sont les surtensions d'activation, de concentration et ohmiques

Les différents termes de ces équations sont calculés via les formules suivantes (équations (3.3) à (3.8)). Elles incorporent plusieurs paramètres de fitting permettant une adaptation simplifiée à des résultats expérimentaux [Springer, 1991].

$$E_n = -\frac{\Delta H - T\Delta S}{2F} + \frac{R T_{PAC}}{2F} * \ln\left(\frac{P_{H_2} * P_{O_2}^{1/2}}{P_0^{3/2}}\right) \quad (3.3)$$

$$\Delta V_{act} = K_1 \frac{R T_{PAC}}{F} \ln\left(\frac{j + j_{loss}}{j_0}\right) \quad (3.4)$$

$$\Delta V_{conc} = K_3 T_{PAC} \ln\left(1 - \frac{j}{j_L}\right) \quad (3.5)$$

$$\Delta V_{ohm} = R_m I_{PAC} \quad (3.6)$$

$$j_0 = K_2 \frac{P_{O_2}}{P_0} \exp\left(-\frac{E_c}{R T_{PAC}} \left(1 - \frac{T_{PAC}}{T_0}\right)\right) \quad (3.7)$$

$$R_m = K_4 \frac{t_{mb}}{b_{11} * \Lambda_{mb} - b_{12}} \exp\left(-K_5 * \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{PAC}}\right)\right) \quad (3.8)$$

Où  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$  sont des paramètres de réglage,  $T_0$  est la température standard,  $T_{PAC}$  est la température de la PAC,  $R_m$  est la résistance associée à la membrane,  $P_0$  est la pression standard,  $P_{O_2}$  est la pression en oxygène au niveau du support catalytique,  $P_{H_2}$  est la pression en hydrogène au niveau du support catalytique,  $E_c$  est l'énergie d'activation de la réaction,  $j_{loss}$  est la densité de courant de fuites,  $j$  est la densité de courant,  $j_0$  est la densité de courant d'échange et  $j_L$  est la densité de courant limite.

Plusieurs phénomènes peuvent influencer de façon dynamique sur la tension de cellule. Les phénomènes les plus notables sont causés par la capacité double couche, la diffusion des espèces gazeuses dans la GDL ou l'impact de l'hydratation de la membrane sur la résistance de cette dernière. Les constantes de temps associées à chacun de ces phénomènes sont présentées dans le tableau 3.1 [Hou et al., 2011].

TABLE 3.1 – Constante de temps des phénomènes influant sur la tension

<i>Phénomène</i>	<i>Constante de temps (s)</i>
Capacité double couche	$10^{-4}$
Diffusion des gaz	$10^{-1}$
Hydratation de la membrane	$10^1$

La gamme de temps de réponse caractéristique des variations des variables de puissance au cours d'un cycle de conduite sont de l'ordre de la seconde (similaires aux variations de la vitesse). Comme ce modèle est utilisé pour l'évaluation de stratégie de gestion énergétique, les phénomènes ayant une constante de temps très faible n'auront pas de

conséquence significative sur les résultats finaux. La capacité double couche et la diffusion des gaz dans la GDL ne seront donc pas considérés [Tang et al., 2010]. Seul l'impact de l'hydratation de la membrane sur la résistance de la membrane le sera. Le degré de précision nécessaire à la modélisation analytique de ce phénomène étant très important, nous aurons recours ici à une modélisation empirique (équation (3.9)) :

$$V_{cell,d} + \tau \frac{dV_{cell,d}}{dt} = K \frac{dI}{dt} \quad (3.9)$$

$\tau$  et  $K$  sont des paramètres de réglages.

La quantité de réactif consommé dépend du courant et du nombre de cellule.

$$q_{H_2,r} = \frac{N_{cell} I_{PAC}}{2 F} \quad (3.10)$$

$$q_{O_2,r} = \frac{N_{cell} I_{PAC}}{4 F} \quad (3.11)$$

L'entropie créée par la réaction chimique est calculée grâce à la formule suivante :

$$\Delta S_q = N_{cell} \frac{(\Delta H/2F - V_{cell}) I_{PAC}}{T_{PAC}} \quad (3.12)$$

La représentation énergétique macroscopique de ce sous-système est la suivante :

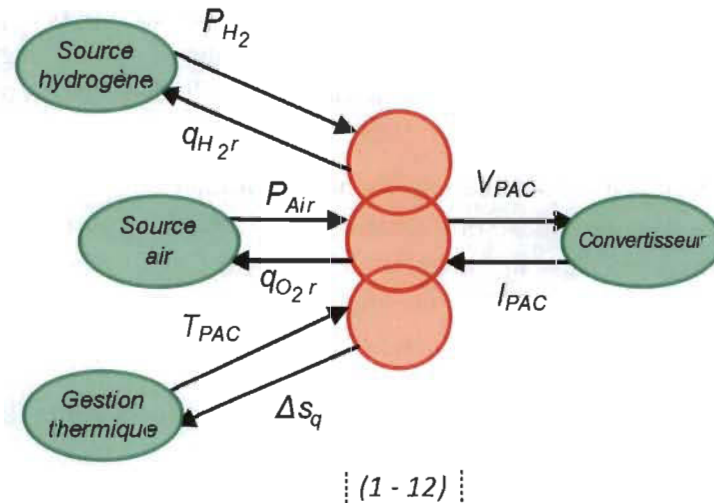


FIGURE 3.4 – REM du sous-système électrochimie

### 3.3.1.2/ APPORT EN RÉACTIF

Le schéma fluide et le circuit électrique équivalent présentés en figure 3.5 sont utilisés pour modéliser l'apport en air dans le stack.

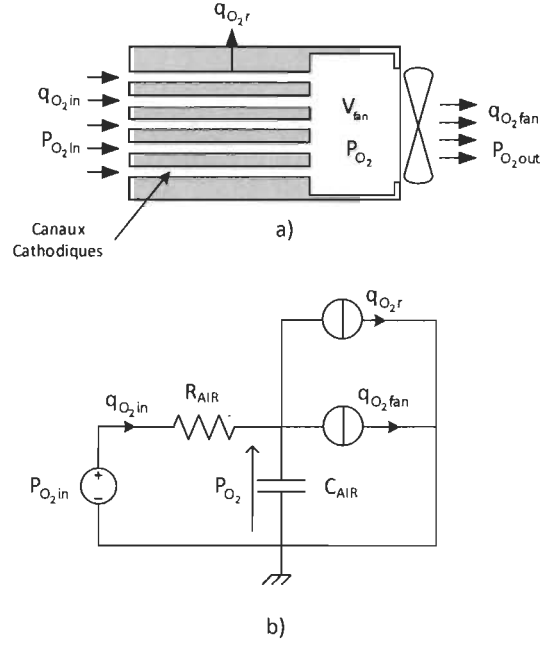


FIGURE 3.5 – Représentation du circuit fluidique et circuit équivalent du sous-système d'apport en air

Les équations suivantes sont issues du circuit équivalent électrique.

$$q_{air,in} = \frac{P_{air,out} - P_{air}}{R_{air}} \quad (3.13)$$

$$q_{air} = q_{air,in} - x_{O_2} \cdot q_{O_2,r} \quad (3.14)$$

$$P_{air} = \frac{1}{C_{AIR}} \int (q_{air} - q_{air,fan}) dt \quad \text{avec } C_{AIR} = \frac{V_{mol,air} V_{fan}}{R T_{PAC}} \quad (3.15)$$

Où  $R_{air}$  est la résistance équivalente entre l'entrée et la sortie de la cathode et  $C_{AIR}$  est la capacité équivalente associée au volume cathodique.

La REM de ce sous-système est présentée en figure 3.6

Le schéma fluidique et le circuit électrique équivalent présentés en figure 3.7 sont utilisés pour modéliser l'apport en hydrogène dans le stack.

Les équations suivantes sont issues du circuit équivalent électrique.

$$q_{H_2,in} = \frac{P_{H_2in} - P_{H_2}}{R_{H_2}} \quad (3.16)$$

$$P_{H_2} = \frac{1}{C_{AN}} \int (q_{H_2in} - q_{H_2c}) dt \quad \text{avec } C_{AN} = \frac{V_{mol} V_{AN}}{R T_{PAC}} \quad (3.17)$$

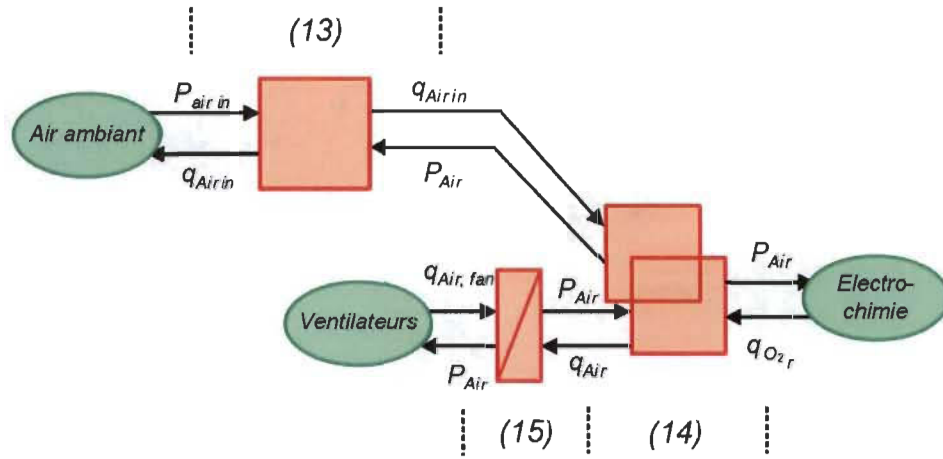


FIGURE 3.6 – REM du sous-système d'apport en air

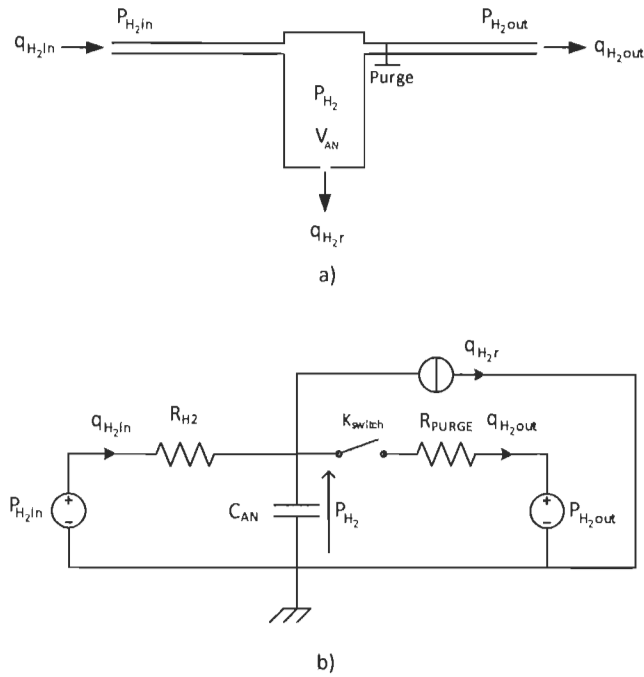


FIGURE 3.7 – Représentation du circuit fluidique et circuit équivalent du sous-système d'apport en hydrogène

$$q_{H_2c} = q_{H_2out} + q_{H_2,r} \quad (3.18)$$

$$q_{H_2,out} = K_{purge} \frac{P_{H_2} - P_{H_2,out}}{R_{purge}} \quad (3.19)$$

Où  $K_{purge}$  est l'état de la valve de sortie d'hydrogène,  $R_{H_2}$  est la résistance équivalente



entre l'entrée et la sortie de l'anode et  $C_{AN}$  est la capacité équivalente associée au volume anodique.

La REM de ce sous-système est présentée en figure 3.8

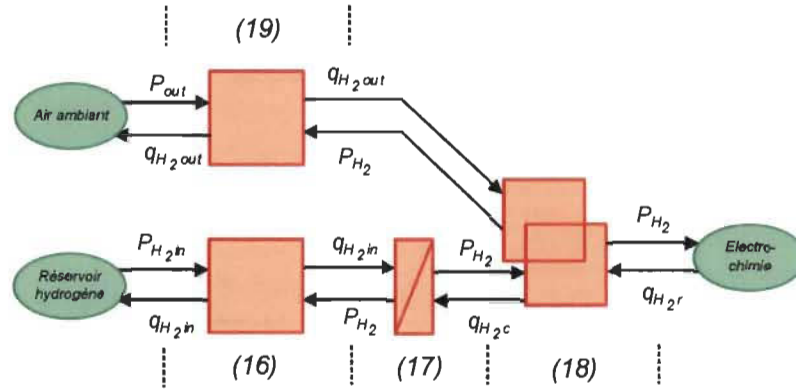


FIGURE 3.8 – REM du sous-système d'apport en hydrogène

### 3.3.1.3/ COMPORTEMENT THERMIQUE

Le comportement thermique du stack dépend des phénomènes de convection, de production de chaleur interne et de sa capacité thermique.

$$q_{conv,free} = h_{free} A (T_{PAC} - T_{Air}) \quad (3.20)$$

Où  $h_{free}$  est le coefficient de transfert thermique par convection libre et  $A$  la surface caractéristique de l'échange thermique.

La convection forcée est modélisée de façon analytique et se base sur une représentation de la plaque bipolaire sous forme d'un arrangement d'ailettes [Incropera, 2002] :

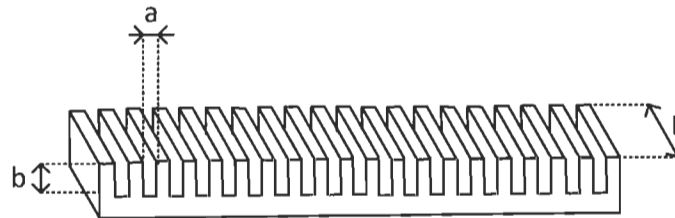


FIGURE 3.9 – Arrangement d'ailettes

$$q_{conv,forced} = \bar{h} A_t \eta_{therm} \theta_{b,lm} \quad (3.21)$$

$$q_{conv} = q_{conv,free} + q_{conv,forced} \quad (3.22)$$



$$T_{PAC} = \frac{1}{C_{PAC}} \int (q_{int} - q_{conv}) dt \quad \text{avec } q_{int} = T_{PAC} \Delta S_q \quad (3.23)$$

Où  $\bar{h}$  est le coefficient de transfert thermique moyen par convection forcée,  $A_t$  la surface caractéristique de l'échange thermique par convection forcée,  $C_{PAC}$ ,  $\eta_{therm}$  est le rendement du transfert thermique et  $\theta_{b,lm}$  est la différence de température logarithmique.

La REM de ce sous-système est présentée en figure 3.10

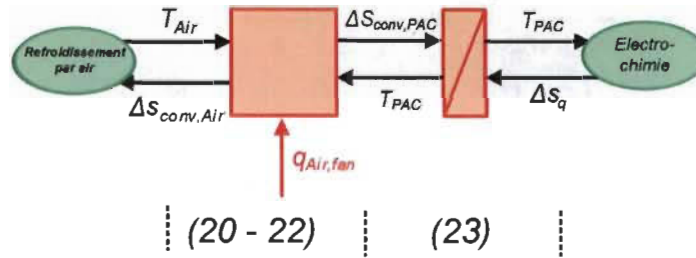


FIGURE 3.10 – REM du sous-système thermique

### 3.3.2/ CONVERTISSEUR DE PUISSANCE

Le convertisseur adapte la tension de sortie de pile à la tension de bus et permet de réguler le courant débité par la pile. Les pertes au niveau du convertisseur se traduisent en un courant de perte que l'on soustrait au courant de sortie du convertisseur tel que présenté dans l'équation (3.24).

$$I_{conv} = \frac{1}{L_{conv}} \int (V_{bus} - V_{conv}) - I_{loss} dt \quad (3.24)$$

L'adaptation de tension sera décrite comme celle d'un convertisseur boost :

$$V_{conv} = \frac{1}{1 - \alpha} V_{PAC} \quad (3.25)$$

$$I_{PAC} = \frac{1}{1 - \alpha} I_{conv} \quad (3.26)$$

La REM de ce sous-système est présentée en figure 3.11

### 3.3.3/ VENTILATEURS

Les ventilateurs se composent d'un moteur rDC relié à des pales aspirant l'air dans la pile :

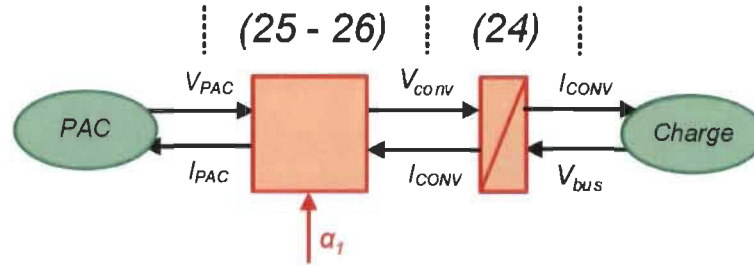


FIGURE 3.11 – REM du sous-système convertisseur de puissance

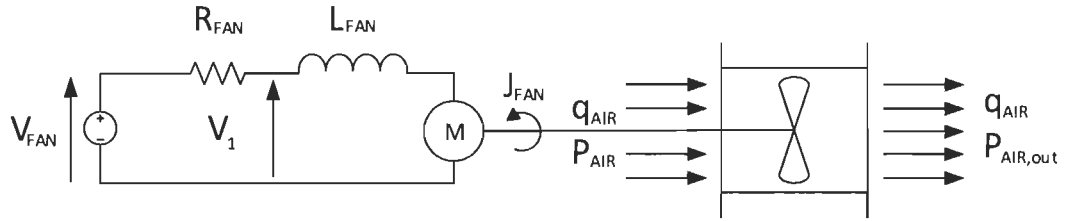


FIGURE 3.12 – Composition d'un ventilateur

### 3.3.3.1/ MOTEUR DC

Pour la partie électrique, le moteur DC sera modélisé par une force électromotrice, une résistance interne et une inductance interne. Il sera couplé à une source de tension :

$$V_1 = V_{FAN} - R_{FAN} I_{FAN} \quad (3.27)$$

$$I_{FAN} = \frac{1}{L_{FAN}} \int (V_1 - E) dt \quad (3.28)$$

$$E = k \Omega \quad (3.29)$$

La partie mécanique sera modélisée par la conversion électromécanique qui sera considérée avec pertes et la variation de vitesse dépendra de l'inertie de l'arbre et des pâles, du couple moteur et du couple résistant.

$$T_m = k I_{FAN} - T_{loss} \quad (3.30)$$

$$\Omega = \frac{1}{J_{FAN}} \int (T_M - T_{aero}) dt \quad (3.31)$$

### 3.3.3.2/ PALES ET MODÈLE AÉROLIQUE

La conversion du mouvement de rotation des pales en flux d'air est modélisée de la façon suivante.

$$q_{air} = \eta_{aero} k_{aero} \Omega \quad (3.32)$$

Le couple résistant dépend de la géométrie des pales et de leur vitesse de rotation.

$$\begin{aligned} T_{aero} &= N_b \int_{r=R_0}^{R_b} \left( \frac{1}{2} \rho_{air} C_d e_b (r \Omega \cos \theta)^2 \right) \cdot r dr \\ &= N_b \left( \frac{1}{8} \rho_{air} C_d e_b (R_b^4 - R_0^4) (\Omega \cos \theta)^2 \right) \end{aligned} \quad (3.33)$$

La REM de ce sous-système est présentée en figure 3.13

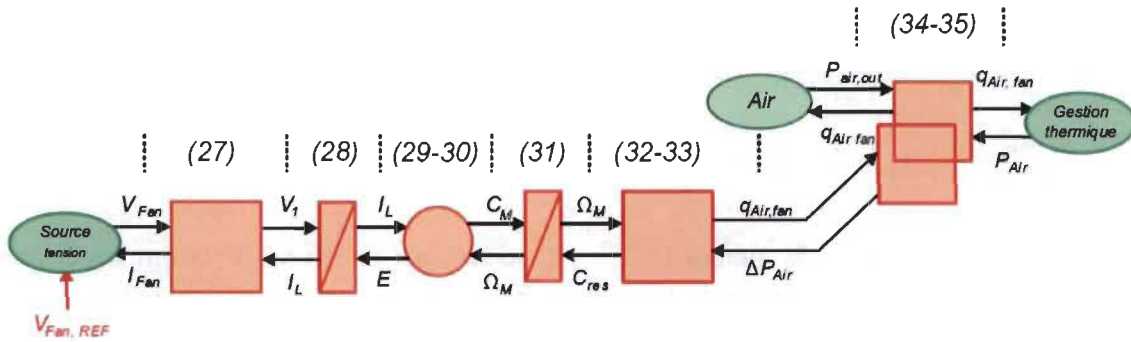


FIGURE 3.13 – REM du sous-système convertisseur de puissance

### 3.3.4/ BATTERIES

Il existe un grand nombre de modèles de batteries lithium-ion. Ces modèles varient selon les besoins qu'ils remplissent. Ainsi on retrouve des modèles ayant des degrés de précision différents. Certains intègrent une modélisation fine des phénomènes physiques et électrochimiques et permettent d'obtenir une meilleure compréhension du comportement des espèces chimiques au sein de la batterie [Zhao et al., 2015]-[Smith et al., 2007]. D'autres modèles, semi-empiriques, permettent de décrire le comportement de la tension à l'aide d'une représentation équivalente sous forme de circuit électrique [González-Longatt, 2006]. Ces modèles traduisent les conséquences macroscopiques des phénomènes électrochimiques en dipôle électrique permettant de caractériser la diffusion des espèces chimiques ou les pertes thermiques par exemple. Ils sont en général moins coûteux en temps de calcul qu'un modèle physique ou électrochimique. N'ayant besoin de modéliser uniquement le comportement énergétique de la batterie nous nous tournerons vers ce type de modélisation. Ces modèles équivalent électrique peuvent traduire plusieurs niveaux de représentation. Ainsi, le modèle d'ordre zéro est composée

d'une source de tension représentant l'OCV et d'une résistance interne représentant la résistance statique totale du système. Le modèle d'ordre 1 permet d'intégrer un comportement dynamique pour plus de précision. Enfin, le modèle d'ordre  $n$  lui permet de modéliser des phénomènes dynamiques avec plusieurs constantes de temps différentes. Ces différents circuits sont présentés en figure 3.14.

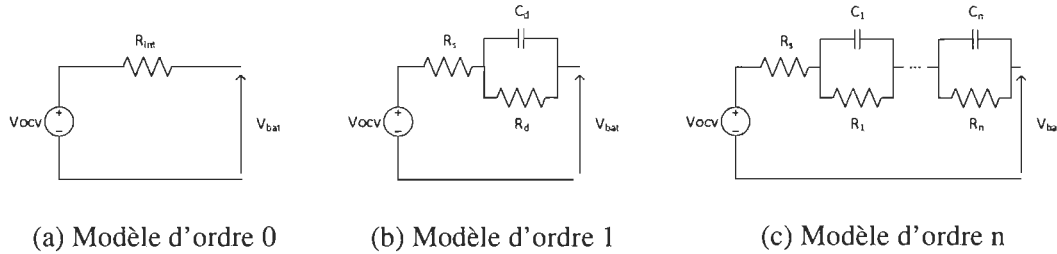


FIGURE 3.14 – Ordre de la modélisation par circuit équivalent

La batterie est un élément important du système hybride mais ce n'est pas l'élément principal sur lequel nous agissons dans la suite de ces travaux. Ici, nous opterons pour une modélisation simple de la batterie. Afin de se focaliser sur le comportement énergétique, il est nécessaire de prendre en compte les pertes thermiques. Nous utiliserons donc un modèle d'ordre 0. Les paramètres du modèle (tension à vide, résistance interne) varient avec la température et l'état de charge du système. Toutefois, par manque de données et comme la batterie n'est pas l'élément central de ces travaux nous ne prendrons pas en compte ces variations. La REM de ce sous système est présentée en figure 3.15.

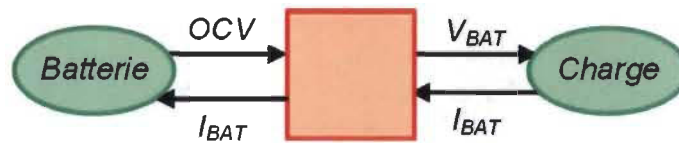


FIGURE 3.15 – REM du sous-système batterie

L'état de charge de la batterie est calculé à partir de l'équation suivante :

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \int_{t=t_0}^t \frac{I_{BAT}}{C_{BAT}} dt \quad (3.34)$$

### 3.3.5/ MODÈLE GLOBAL REM

Le modèle REM du système pile à combustible est composé des différents sous-modèles présentés dans les sections précédentes. Les différentes sources du système et la charge sont reliés entre elles par l'intermédiaire d'un élément de couplage. La figure 3.16 représente l'association d'une système PAC et d'une batterie. Il est possible de rajouter facilement d'autres sources en les reliant à l'élément de couplage cité précédemment.

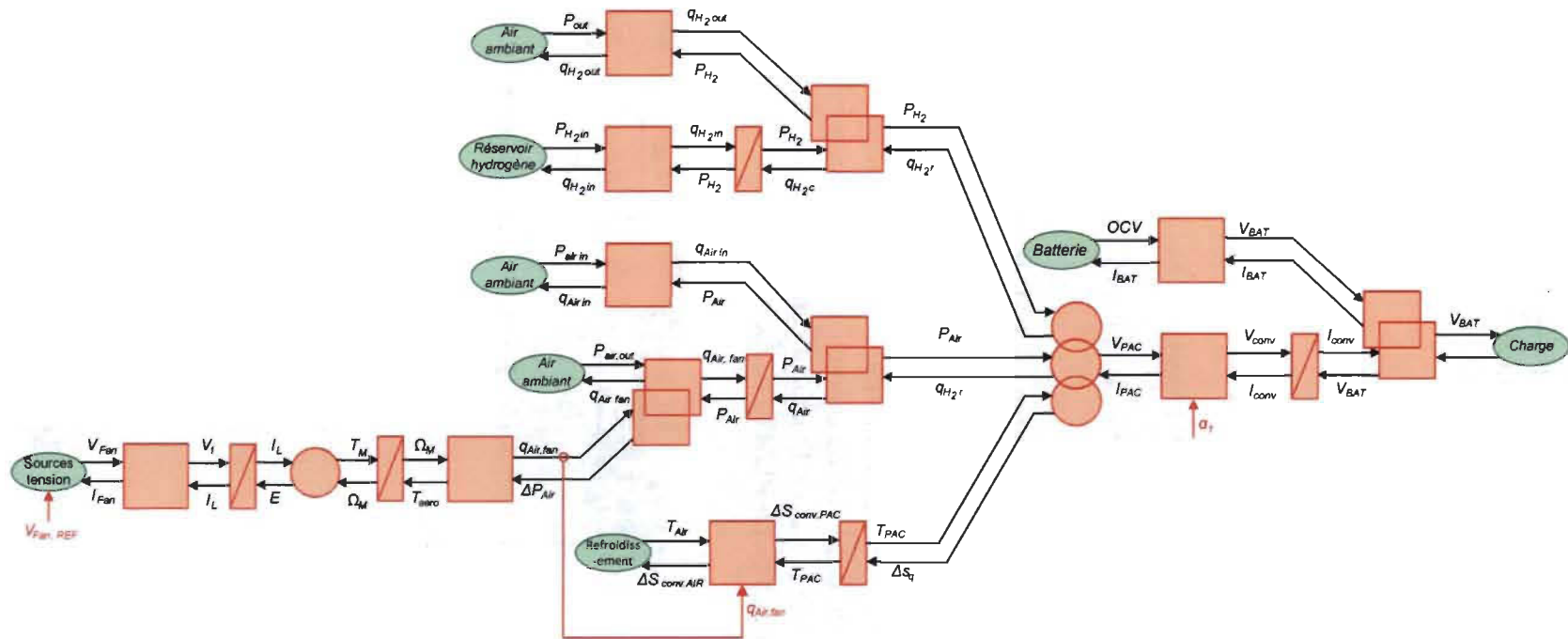


FIGURE 3.16 – Système hybride pile à combustible / batterie

## 3.3.6/ PARAMÉTRAGE DU MODÈLE

Afin d'identifier les paramètres du modèle, plusieurs acquisitions expérimentales sur les différents sous-systèmes ont été effectuées. Le banc d'essai (figure 3.17) est composé d'une PAC H-500 de Horizon et d'un convertisseur de puissance DC15036-SU de Zahn Electronics

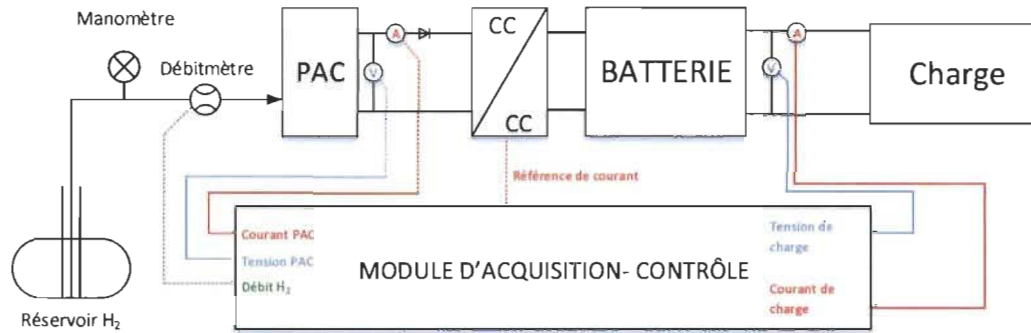


FIGURE 3.17 – Banc de test

## 3.3.6.1/ TENSION DE SORTIE - TEMPÉRATURE - DÉBIT D'HYDROGÈNE

La première acquisition a été effectuée dans le but d'obtenir la courbe de polarisation du système. Durant l'essai, le courant est incrémenté par palier de 2.5 A et ces paliers durent 50s afin d'atteindre le régime permanent. La tension de sortie, la température du stack et le débit d'hydrogène sont enregistrés et les résultats de simulations et expérimentaux sont présentés sur la figure 3.18.

Les paramètres  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $j_{loss}$ ,  $j_L$ ,  $C_{PAC}$  et  $\eta_{therm}$  sont évalués en utilisant ces courbes.

Le modèle a été conçu pour être utilisé dans le cadre d'applications automobiles ou du ressort des domaines du transport. Il est donc nécessaire qu'il soit précis quand on lui impose un profil de puissance dynamique. Le profil de puissance utilisé dans ce cas est présenté en figure 3.19. Un filtre du premier ordre<sup>5</sup> a été utilisé pour atténuer les transitoires de puissance (équation (3.35)). Il a ensuite fallu mettre à l'échelle le profil de puissance pour qu'il convienne à la pile du banc de test.

$$H(s) = \frac{1}{1 + 30s} \quad (3.35)$$

5. La fréquence de coupure a été fixée à 30 secondes car il a été montré qu'un passage de puissance nulle à puissance maximale pouvait être effectué en une durée de 30 secondes sans apparitions des phénomènes de "starvation" dans le cadre de l'étude [Thounthong et al., 2009]

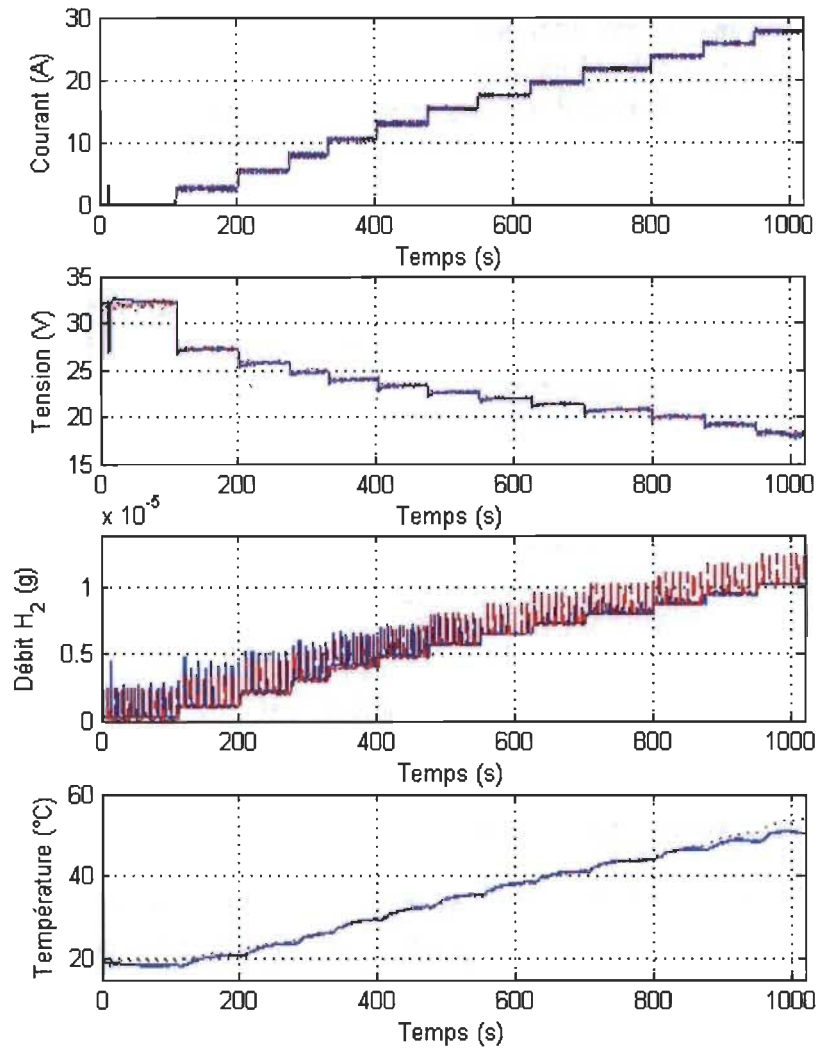


FIGURE 3.18 – Courbes de polarisation - bleue : expérimentale, rouge : simulation

Les résultats de simulation et expérimentaux sont obtenus pour une température ambiante de 20° C et pour un flux d'air de  $60 \text{ g.s}^{-1}$ . Durant les transitoires lents et les périodes quasi-statiques, on remarque que les courbes expérimentales et de simulation sont proches.

### 3.3.6.2/ CONVERTISSEUR DE PUISSANCE

L'acquisition a pour but ici d'identifier les pertes du convertisseur en fonction du point de fonctionnement.



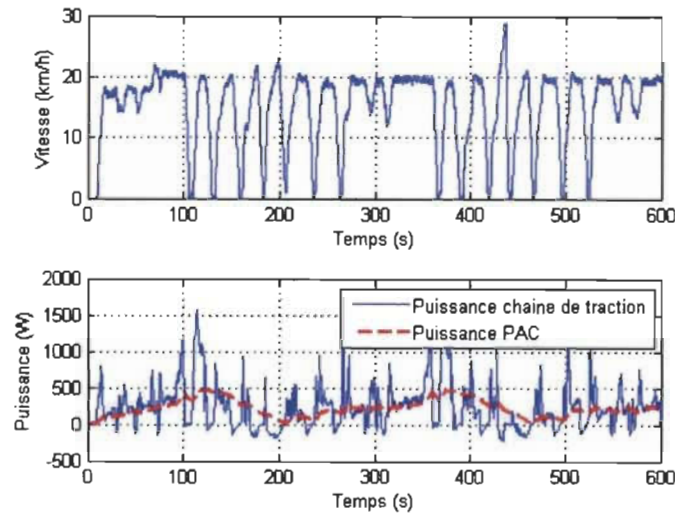


FIGURE 3.19 – Cycle de conduite : profils de vitesse et de puissance

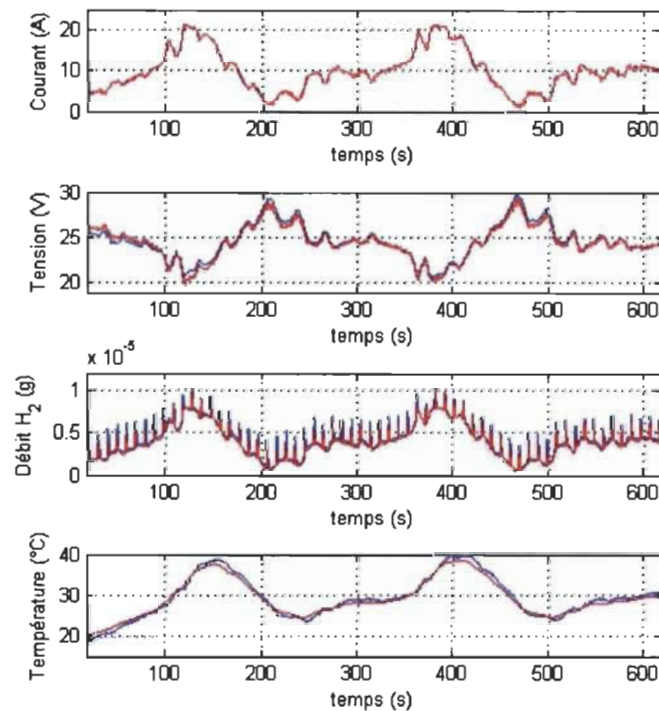


FIGURE 3.20 – Comportement du stack - bleu : expérimentale, rouge : simulation

### 3.3.6.3/ MOTEUR DC ET MODÈLE AÉRAULIQUE

Il faut ici identifier les paramètres du moteur DC et de la conversion aéraulique. La première figure présente l'évolution du courant dans le cas d'une référence de tension de 12V. La seconde figure présente la mesure du débit d'air pour plusieurs tensions. La



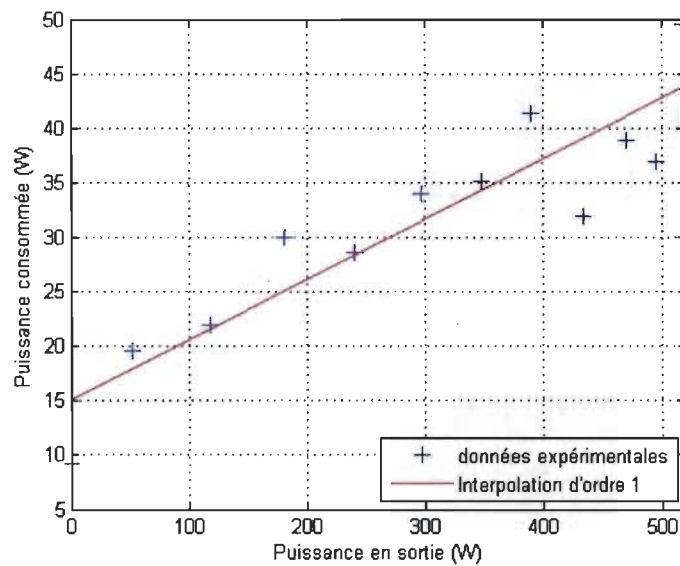
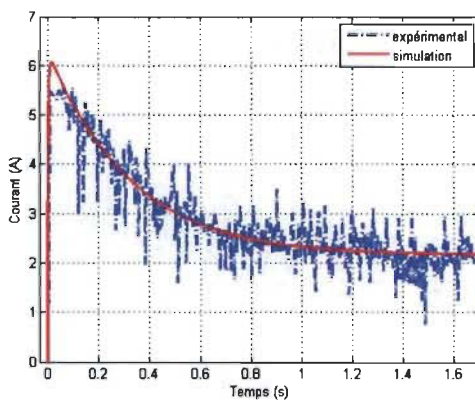
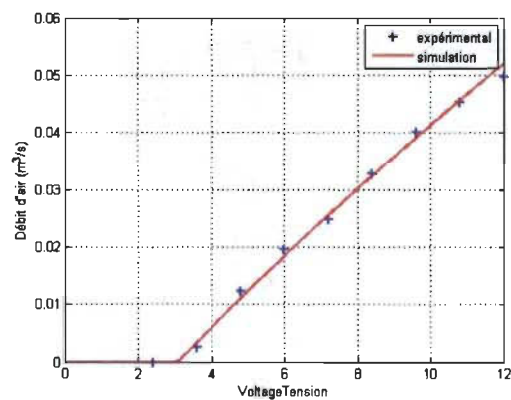


FIGURE 3.21 – Pertes dans le convertisseur statique en fonction de la puissance en sortie

différence entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux est causée par la commutation du courant intrinsèque au fonctionnement du moteur DC <sup>6</sup>.



(a) Courant dans l'induit du moteur DC



(b) Flux d'air en fonction de la tension d'entrée

### 3.3.6.4/ PARAMÈTRES

Les paramètres du modèle obtenu à partir de ces essais expérimentaux sont les suivants :

6. Lors du fonctionnement du moteur DC employé, la commutation de tension au niveau des bobinages imposée par la commande est à l'origine des transitoires rapides présents dans la figure 3.22a

TABLE 3.2 – Paramètres du modèle

Paramètre	Valeur	Unité
<b>Conversion électrochimique</b>		
$b_{11}$	$5.139 \cdot 10^{-5}$	—
$b_{12}$	$3.26 \cdot 10^{-5}$	—
$K$	2	$\Omega \cdot s$
$K_1$	1.44	—
$K_2$	$0.88 \cdot 10^{-6}$	$A \cdot cm^{-2}$
$K_3$	1.4	$V \cdot K^{-1}$
$K_4$	1.9	$\Omega \cdot cm^2$
$K_5$	1268	$K$
$J_{loss}$	1	$mA \cdot cm^{-2}$
$J_L$	684	$mA \cdot cm^{-2}$
$N_{cell}$	36	—
$S_{menu}$	54	$cm^2$
$t_{mb}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$m$
$\tau$	15	$s$
<b>Modèles fluidiques</b>		
$R_{H_2}$	$1.481 \cdot 10^6$	$kg \cdot m^{-4} \cdot s^{-1}$
$R_{purge}$	$2 \cdot 10^8$	$kg \cdot m^{-4} \cdot s^{-1}$
$V_{AN}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$m^3$
$V_{fan}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$m^3$
<b>Modèle thermique</b>		
$C_{PAC}$	$6.9 \cdot 10^2$	$J \cdot K^{-1}$
$\eta_{therm}$	60.3 %	—
$h_{conv,free}$	2.987	$J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
$A$	0.140	$m^3$
<b>Modèle de ventilateur</b>		
$C_d$	0.99	—
$e_b$	$3 \cdot 10^{-2}$	$m$
$J_{FAN}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
$k_{aero}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$m^3 \cdot rad^{-1}$
$N_b$	7	—
$R_{FAN}$	1.93	$\Omega$
$R_0$	$2.0 \cdot 10^{-2}$	$m$
$R_b$	$4.5 \cdot 10^{-2}$	$m$
$\eta_{aero}$	54.9 %	—
$\theta$	43	$^\circ$

### 3.4/ VIEILLISSEMENT

L'impact de la gestion d'un système PAC ou d'une batterie sur son vieillissement n'est pas négligeable. Afin de prendre en compte cet impact, une modélisation de l'influence de la gestion sur le vieillissement des batteries et des piles à combustible est proposée dans cette section.

### 3.4.1/ PILE À COMBUSTIBLE

Les phénomènes influant sur le vieillissement d'une pile à combustible sont nombreux, affectent différents éléments de la pile à combustible et impliquent plusieurs domaines physiques. Ainsi, les différents éléments constituant la pile à combustible ne se dégradent pas de façon identique. De plus, les phénomènes mis en jeu dans la dégradation de la pile à combustible sont pour la plupart couplés. Nous nous intéresserons ici à l'influence du profil de puissance imposée sur le vieillissement. Nous présenterons premièrement les causes de dégradation et ensuite la modélisation de l'impact du profil de puissance subi par la pile sur son vieillissement.

#### 3.4.1.1/ CYCLAGE - POTENTIEL

Les piles à combustible doivent faire face à des changements rapides de la charge qui leur est imposée. Lorsque le potentiel cathodique augmente rapidement, le platine peut se dissoudre à une vitesse plus élevée. Ainsi la solubilité du platine reste stable lorsque la charge est constante [Fuller et al., 1993] mais lors de rapides variations d'un potentiel faible à un potentiel élevé la solubilité du platine augmente drastiquement [Patterson, 2002].

#### 3.4.1.2/ CYCLAGE - DÉMARRAGE/ARRÊT

Dans le cadre d'arrêts de longue durée pour lesquelles le stack n'est pas alimenté en hydrogène, l'hydrogène se diffuse de l'anode vers la cathode. L'anode se vide donc de son hydrogène. Lors du redémarrage il y aura donc une période de transition au cours de laquelle l'hydrogène se propage dans les canaux anodiques. Au niveau du front séparant l'hydrogène pénétrant dans le stack et l'air évacué par cette hydrogène, de forts potentiels intra-anode peuvent émerger et causer une dégradation considérable [Meyers et al., 2006].

#### 3.4.1.3/ MANQUE DE CARBURANT

Les cellules de tailles importantes ( $\geq$  plusieurs centaines de  $cm^2$ ) sont soumises à une variation importante des conditions de fonctionnement entre la canalisation d'arrivée et celle de sortie. De plus, les cellules au sein d'un stack peuvent connaître des flux différents en air ou carburant. Un appauvrissement local mènera à une forte corrosion locale de la cathode entraînant une dégradation irréversible de l'électrode. Le manque de carburant est un phénomène qui se produit à fortes densités de courant ou lors de transitions rapides de courant [Taniguchi et al., 2004].

#### 3.4.1.4/ TEMPÉRATURE - HUMIDITÉ RELATIVE

L'humidité relative de la membrane évolue en fonction de la charge. Lorsque la charge est faible, la membrane est relativement froide et humide. Lorsque la charge est élevée, la membrane est chaude et sèche. La transition entre une humidité élevée et une humidité

faible impose un stress mécanique important au niveau de la membrane pouvant résulter en une dégradation plus rapide [Huang et al., 2006].

#### 3.4.1.5/ MODÉLISATION

Les travaux de ce manuscrit ne portent pas sur l'influence de la température ou de l'humidité. Ainsi seules les dépendances au cyclage et au manque de carburant doivent être prises en compte. Toutefois, par manque de données expérimentales concernant l'influence du manque de carburant et pour un soucis de simplification, seule la dépendance au cyclage sera prise en compte ici. Le manque de carburant sera limité par l'introduction d'une contrainte sur la dérivée de la puissance.

Il n'existe pas encore de modélisation analytique complète de l'influence du profil de puissance sur le vieillissement du stack. Les solutions proposées dans la littérature s'orientent vers des solutions empiriques utilisant des essais de vieillissement comme base.

Les travaux présentés dans [Laffly et al., 2007] proposent d'utiliser les courbes de polarisation effectuées durant des essais de vieillissement pour caractériser l'évolution des performances de la PAC en fonction du temps d'utilisation. Ainsi la tension aux bornes du stack est obtenue en interpolant entre deux courbes de polarisation en fonction du temps. Cette méthode permet d'obtenir de bons résultats mais nécessite le sacrifice d'un stack. De plus, cette méthode restreint le profil de puissance imposé à la pile à celui qui a été utilisé durant les essais de vieillissement. Ces travaux ne peuvent donc pas être appliqués dans le cadre de cette thèse car le profil de puissance imposé aux piles n'est pas fixé.

L'approche présentée dans [Chen et al., 2015] propose une modélisation empirique de l'impact du profil de puissance sur le vieillissement du système. Le vieillissement du système est alors calculé grâce à l'expression suivante :

$$\delta_{PAC} = n_1 V_1 + t_1 U_1 + n_2 V_2 + t_2 U_2 \quad (3.36)$$

où  $\delta_{PAC}$  est le facteur d'état de santé du stack, compris entre 0 (début de vie) et 1 (fin de vie),  $n_1$  est le nombre de démarrage que la pile a subit,  $t_1$  la durée de fonctionnement à basse puissance,  $t_2$  la durée de fonctionnement à haute puissance et  $n_2$  le nombre de transition entre basses et hautes puissances.  $V_1$ ,  $U_1$ ,  $V_2$  et  $U_2$  représentent le vieillissement associé à chacun de ces facteurs.

Cette expression s'adapte au profil de puissance utilisé. Son utilisation est donc pertinente dans le cadre de cette thèse. La définition des termes hautes et basses puissances est applicable dans le cadre d'une gestion énergétique thermostatique oscillant entre puissance minimale et maximale. Ce n'est pas le cas ici, il sera donc nécessaire de revoir la formule. Ici, nous avons choisi de la simplifier en ne différenciant pas les niveaux de puissance. De plus, comme le niveau de puissance n'est plus pris en compte, la dépendance du vieillissement a également été supprimée. Nous aboutissons alors sur la formule suivante.

$$\delta_{PAC} = n dV_1 + t dV_2 \quad (3.37)$$

où  $n$  est le nombre de démarrage que la pile a subit,  $dV_1$  est la dégradation associée au

démarrage et à l'arrêt d'une pile,  $t$  est la durée de fonctionnement de la pile et  $dV_2$  la dégradation associée.

### 3.4.2/ BATTERIE

Les phénomènes influant sur le vieillissement d'une batterie sont nombreux et sont basés sur des interactions entre différents domaines (thermique, électrochimie et physique principalement). Différents types de modélisation existent et répondent à différents types de besoins.

Les modèles électrochimiques permettent de rendre compte des phénomènes physiques, chimiques et électrochimiques tels que le transfert des charges et la diffusion des espèces chimiques. Ces modèles sont complexes à mettre en œuvre car ils nécessitent une connaissance détaillée de la technologie modélisée et de la batterie dont on cherche à modéliser le fonctionnement.

Les modèles empiriques s'appuient sur des essais expérimentaux et n'imposent pas une charge de calcul trop importante durant leur exécution. Dans le cadre de cette thèse c'est un modèle empirique que nous utiliserons. La modélisation proposée par [Onori et al., 2012] impose que le vieillissement de la batterie dépend du courant de charge ou de décharge ( $I_{bat}$ ) et d'une constante définissant la quantité totale d'ampère-heure que la batterie peut fournir ou accepter ( $\Lambda_{bat}$ ). L'expression suivante décrit cette dépendance :

$$\delta_{Bat} = \frac{1}{\Lambda_{bat}} \int_0^t |I_{BAT}| dt \quad (3.38)$$

### 3.5/ CONCLUSION

Le modèle présenté dans ce chapitre permet de simuler l'évolution de la tension, de la température et de la consommation d'hydrogène en fonction du profil d'utilisation. Il utilise le formalisme REM qui permet de décrire plus facilement les échanges énergétiques entre les éléments du système PAC. L'impact du profil d'utilisation sur la dégradation des piles à combustible et des batteries est également décrit à travers une modélisation empirique. Une validation expérimentale du comportement énergétique a été effectuée et affiche de bons résultats. Ce modèle sera utilisé dans la suite des travaux présentés dans ce manuscrit. Le modèle de vieillissement n'a pas été validé expérimentalement et est le point faible de cette modélisation.



## DISTRIBUTION DE PUISSANCE OPTIMALE

Les systèmes multi-pile à combustible à configuration parallèle sont encore peu étudiés. Afin d'évaluer leur potentiel, il est intéressant de quantifier le gain obtenu par rapport aux systèmes monostack conventionnels en terme de coût d'exploitation. Nous considérerons des systèmes hybridés à une batterie comme présentés dans l'introduction. L'hybridation introduit une problématique de distribution de la puissance entre les différents organes du système. Cette problématique est résolue via l'utilisation d'une stratégie de gestion énergétique. Afin de fournir un résultat indépendant du choix d'une stratégie de gestion énergétique, il est nécessaire de comparer les distributions de puissance optimales. Ainsi, seule la fonction objectif considérée demeure un choix subjectif.

### 4.1/ DÉFINITION DE L'ÉTUDE

L'objectif de cette étude est l'établissement et la comparaison des comportements optimaux<sup>1</sup> de la gestion énergétique pour des systèmes multi-pile et monopile équivalents dans le cadre d'une application automobile.

L'application automobile considérée ici est caractérisée par l'utilisation d'un véhicule de type berline sur les profils de conduite ARTEMIS [Andre, 2004]. Ces cycles de conduite offrent une représentation des différents scénarii d'utilisation automobile. Ils proposent 3 cycles : urbain, rural et autoroutier. La répartition de ces cycles de conduite sur la durée de vie du véhicule est donnée dans le tableau 4.1.

TABLE 4.1 – Répartition des cycles de conduite ARTEMIS

<i>Cycle</i>	<i>Distribution (%)</i>
Urbain	69.7
Rural	27.5
Autoroutier	2.8

---

1. Ici l'optimalité est définie par rapport au coût d'exploitation du système. Une formulation plus détaillée est proposée dans la suite du chapitre

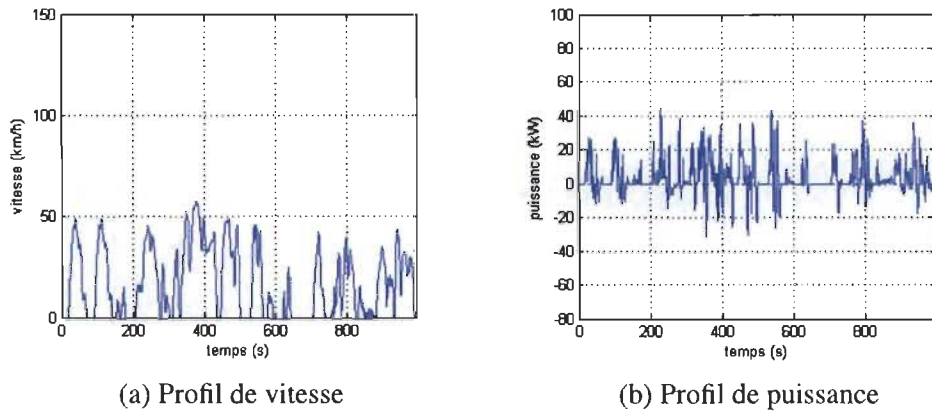


FIGURE 4.1 – Cycle urbain

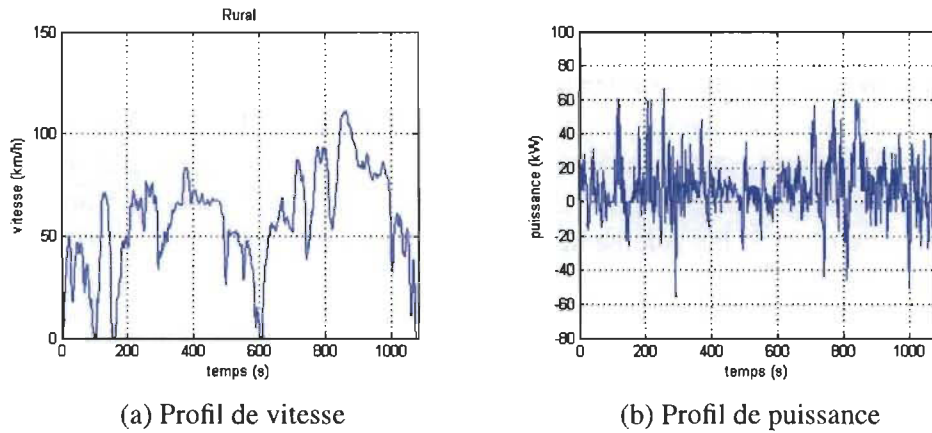


FIGURE 4.2 – Cycle rural

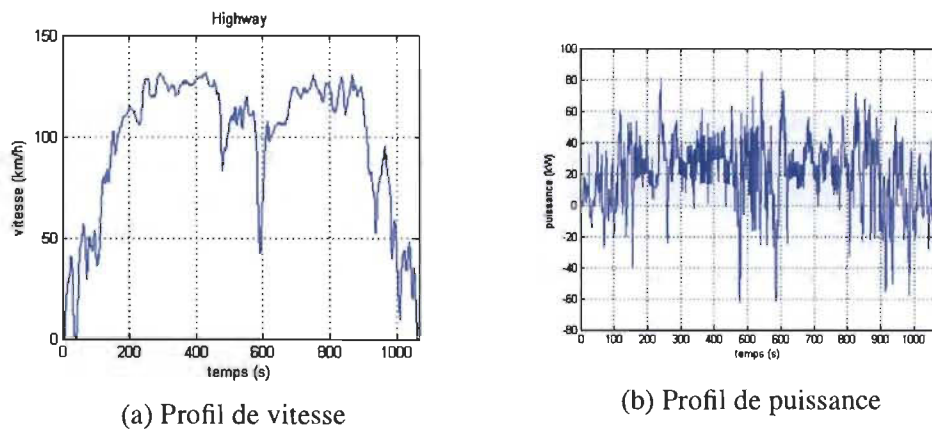


FIGURE 4.3 – Cycle autoroutier

Le dimensionnement des organes du système influe fortement sur ses performances [Bernard et al., 2009] et donc sur la solution du problème d'optimisation. Il est donc nécessaire de présenter les différents dimensionnements qui seront considérés pour cette étude et les contraintes auxquelles le dimensionnement est soumis.

#### 4.1.1/ DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME

Le dimensionnement des sources sera contraint par l'application considérée et les contraintes d'utilisation des sources. Ici nous nous conformerons au cahier des charges de la SAE (Society of Automotive Engineers) pour les véhicules hybridés à une batterie. Les critères issus du cahier des charges SAE que nous retiendrons seront les suivants :

1. Assurer une conduite longue distance sur autoroute à une vitesse de 120 km/h
2. Assurer une conduite longue distance sur route à une vitesse de 80 km/h avec une pente de 6%

La dénomination "longue distance" impose que la batterie ne soit pas la source principale d'énergie dans ce type de fonctionnement. Ainsi, c'est la pile à combustible qui fournira la puissance moyenne.

En plus de ces deux contraintes il est nécessaire que le système hybride puisse fournir la totalité de la charge. Cela impose que la puissance maximale du système soit supérieure ou égale à la puissance maximale que la charge peut imposer.

Afin de quantifier l'impact que ces contraintes auront sur le dimensionnement nous avons simulé le fonctionnement lié aux contraintes 1 et 2 et l'impact de la troisième contrainte est déterminé en étudiant la puissance maximale liée au parcours des cycles de conduite ARTEMIS. Les simulations sont effectuées sur MATLAB 2016 en utilisant la toolbox ADVISOR.

Les contraintes en puissance relatives au cahier des charges et les contraintes du dimensionnement en puissance sont données dans le tableau 4.2.

TABLE 4.2 – Contraintes de dimensionnement

##### **Cahier des charges :**

Conduite sur autoroute	30 kW
Conduite sur route avec pente de 6%	38 kW
Puissance maximale sur cycle ARTEMIS	88 kW

##### **Dimensionnement :**

Puissance minimale pile à combustible	40 kW
Puissance minimale système	100 kW

Le dimensionnement impacte grandement les performances énergétiques du système. Il serait donc judicieux de le considérer variable durant le processus d'optimisation. Toutefois, cela ferait augmenter considérablement la complexité du processus d'optimisation et rendrait le problème d'optimisation difficilement solvable en un temps limité avec des moyens de calcul conventionnel. Pour cette raison, il sera néanmoins fixé pendant



le processus d'optimisation. Cependant nous considérerons plusieurs dimensionnements afin d'étudier son impact sur le coût d'exploitation du système. Le coût d'exploitation du système étant défini comme la somme du coût de l'hydrogène consommé et du coût de la dégradation subie par le système.

Il est possible de caractériser le dimensionnement d'un système hybride en utilisant le taux d'hybridation et la puissance totale comme critères. Le taux d'hybridation ( $\tau$ ) est défini par la formule suivante :

$$\tau = \frac{P_{BAT}}{P_{PAC} + P_{BAT}} \quad (4.1)$$

où  $P_{PAC}$  est la puissance maximale que le système pile à combustible peut fournir et  $P_{BAT}$  est la puissance maximale que la batterie peut fournir. Plus le taux d'hybridation est élevé plus le dimensionnement en puissance du système de stockage énergétique (ici la batterie) est important par rapport au dimensionnement de la source primaire (ici le système pile à combustible).

Les dimensionnements que nous considérerons seront les suivants :

TABLE 4.3 – Dimensionnements étudiés

Dimensionnement	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Cas E
<b>Puissance maximale - système PAC (kW)</b>	40	40	60	80	100
<b>Puissance maximale - batterie (kW)</b>	100	60	40	20	20
<b>Puissance totale (kW)</b>	140	100	100	100	120
<b>Taux d'hybridation (-)</b>	0.71	0.60	0.40	0.20	0.17

Le dimensionnement du cas A est considéré dans cette étude car il permet d'attribuer la totalité de la puissance requise par la charge à la batterie. Cela permet de ne pas être trop contraint vis à vis de la dynamique de puissance lente du système PAC. Toutefois, ce type de dimensionnement à taux d'hybridation élevé n'est pas celui qui est retenu dans l'industrie automobile. Le dimensionnement du cas E reflète ce qu'offre un des véhicules hydrogène commercialisé, la Toyota MIRAI. Le taux d'hybridation est faible (0.17). La charge est donc majoritairement prise en compte par le système PAC. Les cas B, C et D sont considérés dans le but d'étudier des dimensionnements aux taux d'hybridation intermédiaires. De plus, pour ces dimensionnements, la puissance totale du système est égale à la contrainte minimale fixée plus haut.

Afin de limiter la charge de calcul mais aussi être en accord avec le banc de test présenté dans le chapitre précédent, les systèmes multi-pile seront composés de 4 stacks.

Pour chaque dimensionnement, le cas monopile standard sera comparé au cas multi-pile. La dénomination des cas d'études est présentée dans le tableau 4.4.

TABLE 4.4 – Dénomination des cas d'étude

Cas d'étude	Dimensionnement	Type de système PAC
AS	A	monopile
AM	A	multi-pile
BS	B	monopile
BM	B	multi-pile
CS	C	monopile
CM	C	multi-pile
DS	D	monopile
DM	D	multi-pile
ES	E	monopile
EM	E	multi-pile

#### 4.1.1.1/ MODÉLISATION DU SYSTÈME PAC ET DE LA BATTERIE

Les valeurs prises par les variables de la fonction de coût considérée dans ce problème d'optimisation sont basées sur les modèles de comportement énergétique et de vieillissement présentés dans le chapitre précédent. Pour ce qui est du comportement énergétique du système PAC et de la batterie, les valeurs des paramètres des modèles sont les valeurs présentes dans le chapitre précédent. Le modèle de PAC est donc celui d'une pile atmosphérique. Toutefois, la surface active et du nombre de cellule sont ajustés pour correspondre à la puissance requise par le dimensionnement. Pour ce qui est de la batterie, les caractéristiques de la cellule 26650 de A123system sont considérés ici. Il en résulte que la courbe de rendement en p.u. des systèmes PAC considérés est la même pour tous les dimensionnements. Ainsi, le rendement du système PAC est faible à basse puissance et son maximum de rendement est atteint dans la plage 60% – 70% de la puissance maximale du système (Figure 4.4).

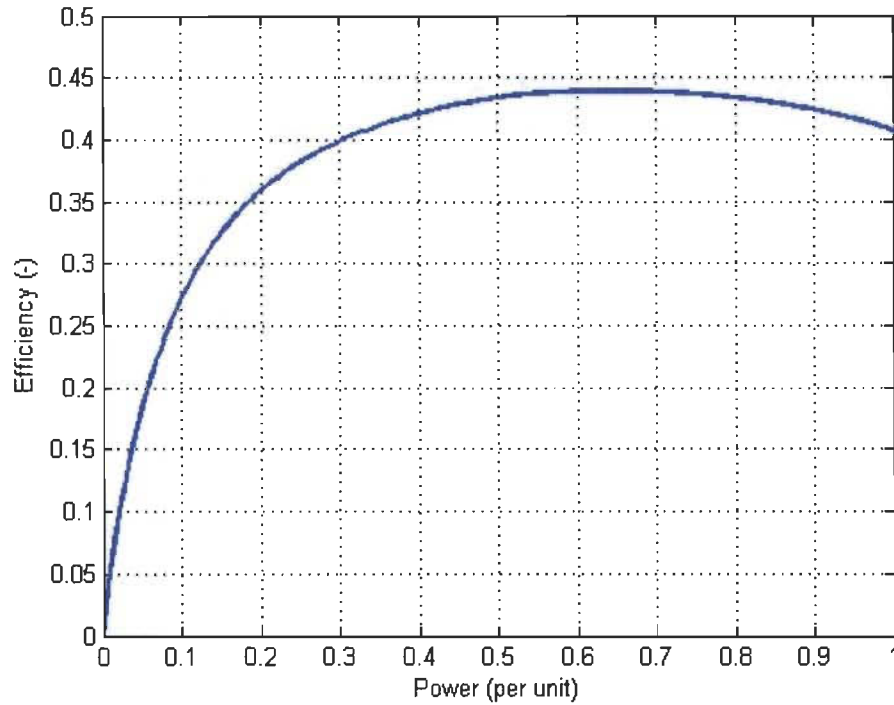


FIGURE 4.4 – Rendement du système PAC

#### 4.1.2/ DÉFINITION DU PROBLÈME D'OPTIMISATION

L'optimisation de la gestion énergétique se traduit par l'optimisation des profils de puissance auxquels les différentes sources du système énergétique sont soumises. La caractérisation du problème requiert d'une part la définition de l'espace de recherche et de la fonction objectif.

##### 4.1.2.1/ ESPACE DE RECHERCHE

L'espace de recherche est défini par les contraintes régissant les profils de puissances imposés à chacune des sources. Dans le cadre de ce chapitre, les profils de puissances seront représentés par des fonctions continues affines par morceau. Ces fonctions continues affines par morceau seront caractérisées par une suite de points. Le profil de la source  $i$  sera donc défini comme suit :

$$\mathbf{P}_i = (P_{i,j})_{j \in \{1,n\}} \quad (4.2)$$

où  $n$  est le nombre de points utilisés pour caractériser le profil et  $P_{i,j}$  la puissance correspondant à chacun de ces points. A chacun de ces points on associera un temps  $t_j$  correspondant.

Il est aussi nécessaire d'introduire une suite  $(\sigma_{i,j})_{j \in \{1,n\}}$  prenant ses valeurs dans l'ensemble  $\{0, 1\}$  (equation (4.3)) traduisant l'état des systèmes PAC (en fonctionnement / à l'arrêt).

$$\sigma_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{si le système est à l'arrêt entre } t_j \text{ et } t_{j+1} \\ 1 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.3)$$

La première contrainte considérée ici impose que la puissance fournie par le système énergétique doit être égale à la puissance requise par la charge. Cela se traduit par la formule suivante :

$$\forall t \in [0, t_{max}], \sum_{i \in \text{sources}} P_i(t) = P_C(t) \quad (4.4)$$

où  $P_C(t)$  est la puissance requise par la charge à l'instant  $t$  et  $P_i(t)$  est la puissance fournie par la source  $i$  à l'instant  $t$ .

La deuxième contrainte est imposée par les limites de puissance des différents systèmes. Ainsi,

$$\forall i \in \text{sources}, \forall j \in \{1, n\}, P_{i,min} \leq P_{i,j} \leq P_{i,max} \quad (4.5)$$

La troisième contrainte impose une limite à la dérivée des profils de puissances imposés aux piles à combustible :

$$\forall i \in \text{sources}, \forall j \in \{1, n-1\}, |P_{i,j+1} - P_{i,j}| \leq d_{i,max}(t_{j+1} - t_j) \quad (4.6)$$

Cette contrainte permet d'éviter de forcer la pile à fonctionner en starvation à cause de la lente dynamique de l'alimentation en air. Il est nécessaire d'introduire cette contrainte car le modèle de vieillissement ne prends pas en compte l'impact de la dynamique de puissance sur le vieillissement.

La quatrième contrainte impose une limite à la plage de variation accessible à l'état de charge de la batterie :

$$\forall j \in \{1, n\}, SoC_{min} \leq SoC_j \leq SoC_{max} \quad (4.7)$$

Cette contrainte est implémentée car le modèle de vieillissement ne prend pas en compte la dépendance du vieillissement de la batterie par rapport à la profondeur de décharge.

La dernière contrainte impose que l'état de charge final soit égal à l'état de charge initial :

$$SoC_1 = SoC_n \quad (4.8)$$

Cette contrainte permet de forcer un comportement compatible avec un fonctionnement longue durée sans complexifier le processus d'optimisation en considérant des états de charge finaux et initiaux variables.

## 4.1.2.2/ FONCTION OBJECTIF

Le coût d'exploitation du système est la fonction objectif considérée pour l'optimisation. Ici, le coût d'exploitation du système ( $f$ ) est défini comme la somme du coût de l'énergie consommée et du coût de la dégradation du système :

$$f(\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N) = C_{\text{énergie}}(\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N) + C_{\text{dégradation}}(\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N) \quad (4.9)$$

La contrainte imposant l'égalité des états de charge initial et final implique que la consommation énergétique au niveau de la batterie est nulle d'un point de vue global. Seule la consommation en hydrogène intervient donc dans le coût de l'énergie consommée.

$$C_{\text{énergie}}(\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N) = c_{H_2} m_{H_2}(\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N) = c_{H_2} \sum_{i=1}^N m_{H_2,i}(\mathbf{P}_i) \quad (4.10)$$

où  $c_{H_2}$  est le coût massique de l'hydrogène,  $m_{H_2}$  est la masse totale d'hydrogène consommée et  $m_{H_2,i}$  est la masse d'hydrogène consommée par le système  $i$ .

Le coût de la dégradation dépend de la dégradation subie par chacun des éléments et de leur coût respectif. On a donc en séparant le coût de la dégradation des systèmes PAC et le coût de la dégradation de la batterie :

$$C_{\text{dégradation}}(\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N, \mathbf{P}_{\text{BAT}}) = \sum_{i=1}^N (C_i \Delta_i(\mathbf{P}_i)) + C_{\text{BAT}} \Delta_{\text{BAT}} \quad (4.11)$$

où  $C_i$  est le coût de l'élément  $i$  et  $\Delta_i$  est la dégradation subie par cet élément au cours du cycle.

Comme présenté dans le chapitre précédent, la dégradation des systèmes pile à combustible peut être exprimée en fonction du temps de fonctionnement et du nombre d'arrêts et démarrages. La dégradation des batteries peut être estimée à partir du profil de puissance qui lui est imposé. On peut alors développer la formule (4.11) :

$$C_{\text{dégradation}}(\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N, \mathbf{P}_{\text{BAT}}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n-1} C_i (\delta_t \sigma_{i,j} (t_{j+1} - t_j) + \Delta_s \kappa_{i,j}) + C_{\text{BAT}} \int_{t=t_1}^{t_n} \frac{1}{\Lambda_{\text{max}}} |P_{\text{BAT}}(t)| dt \quad (4.12)$$

où  $\kappa_{i,j}$  indique si le système est mis à l'arrêt à l'instant  $t_{j+1}$  et est défini tel que :

$$\kappa_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } \sigma_{i,j} = 1 \text{ et } \sigma_{i,j+1} = 0 \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.13)$$

et  $\Lambda_{\text{max}}$  est la quantité totale d'ampère-heure que la batterie peut fournir ou accepter au cours de sa durée de vie (voir chapitre 3).

## 4.1.2.3/ ÉNONCÉ DU PROBLÈME D'OPTIMISATION

Les contraintes et la fonction objectif ayant été définies, il est possible d'énoncer le problème d'optimisation sous sa forme finale ainsi que de préciser les valeurs des paramètres de cout et de dégradation y intervenant. L'encadré suivant résume le problème d'optimisation.

Problème d'optimisation	
$\{\mathbf{P}_1^*, \dots, \mathbf{P}_N^*, \mathbf{P}_{BAT}^*\} = \arg \min_{\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N, \mathbf{P}_{BAT}} f(\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N) \quad (4.14)$ <p>sous contraintes :</p> $\forall t \in [0, t_{max}], \sum_{i \in \text{sources}} P_i(t) = P_C(t) \quad (4.15)$ $\forall i \in \text{sources}, \forall j \in \{1, n\}, P_{i,min} \leq P_{i,j} \leq P_{i,max} \quad (4.16)$ $\forall i \in \text{sources}, \forall j \in \{1, n-1\},  P_{i,j+1} - P_{i,j}  \leq d_{i,max}(t_{j+1} - t_j) \quad (4.17)$ $\forall j \in \{1, n\}, SoC_{min} \leq SoC_j \leq SoC_{max} \quad (4.18)$ $SoC_1 = SoC_n \quad (4.19)$	

Le coût de l'hydrogène considéré pour cette étude est celui annoncé dans les prévisions du département de l'énergie américain pour l'horizon 2020 et est de 2\$/kg. Les coûts des systèmes PAC et de la batterie sont évalués à partir des prévisions du département de l'énergie américain pour les horizons 2020. On considerera donc un coût de 30 \$ par kW pour le système PAC et un coût de 300 \$ par kWh pour la batterie [DOE, 2012, Howell, 2012]<sup>2</sup>. Pour ce qui est des paramètres intervenant dans l'estimation de la dégradation, nous considérerons les valeurs suivantes :

$$\delta_t = 5 \mu\text{V} / \text{cellule} / \text{h} \quad (4.20)$$

$$\Delta_s = 25 \mu\text{V} / \text{cellule} / \text{démarrage} \quad (4.21)$$

$$\Lambda_{BAT} = 14325 C_{BAT} \quad (4.22)$$

La valeur de  $\delta_t$  choisie correspond à la moyenne de la plage de variation présentée dans le chapitre 3. La valeur de  $\Delta_s$  choisie correspond à la plus faible valeur obtenue expérimentalement. Cette valeur a été choisie afin de limiter l'impact des

2. Les coûts annoncés ici sont très ambitieux si l'on considère les révisions apportées par le DOE en 2017 : \$4/kg pour l'hydrogène et \$40/kW pour le stack.



démarrages/arrêts sur la dégradation. Ici la dégradation due à cinq heures de fonctionnement en mode permanent correspond à la dégradation entraînée par un seul cycle de démarrage et d'arrêt. La fin de vie de la pile est obtenue lorsqu'une perte de  $100\mu\text{V}/\text{cellule}$  a été constaté à courant nominal. La valeur de  $\Lambda_{BAT}$  est issue d'une étude expérimentale<sup>3</sup> sur des modules ANR26650 de *A123systems* en fonctionnement automobile [Suttman, 2011].

#### 4.1.3/ MÉTHODE DE RÉOLUTION

Le problème d'optimisation ayant été défini, il est nécessaire de présenter la méthode d'optimisation retenue pour le résoudre. Les méthodes d'optimisation étant nombreuses, nous présenterons brièvement les critères qui auront poussé au choix de la programmation dynamique pour ces travaux. La programmation dynamique et les problématiques liées à son implantation sont également détaillées dans cette section.

A noter que les méthodes de résolution analytique standards telle que celle du multiplicateur de Lagrange ou de l'équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman nécessitent une fonction objectif continue. Hors, le problème d'optimisation défini précédemment ne l'est pas à cause de sa dépendance au nombre de démarrages qui est une variable discrète. Nous ne considérerons donc pas de méthodes exactes pour la suite de cette section.

##### 4.1.3.1/ CHOIX DE LA MÉTHODE D'OPTIMISATION

Il est nécessaire de choisir une méthode fonctionnant hors ligne et pouvant fournir une solution proche de l'optimum global. Il est nécessaire de préciser que l'espace de recherche est convexe mais que la fonction objectif ne l'est pas. Parmi les méthodes permettant d'obtenir l'optimum global pour des problèmes d'optimisation non convexes, on rencontre deux familles de méthodes : les méta-heuristiques et les méthodes algorithmiques.

Les méthodes appartenant à la famille des méta-heuristiques se basent sur l'évolution d'une population (1 ou plusieurs individus) de solutions. La population évolue d'une population initiale généralement aléatoire vers une population dont on pourra extraire une solution proche de la solution optimale. La convergence de ces méthodes vers l'optimum global est assurée de façon stochastique pour un nombre infini d'itérations. Par contre, la vitesse de convergence est fortement liée au nombre de variables considérées et au profil de la fonction objectif. Pour le problème d'optimisation que nous cherchons à résoudre, les variables sont les profils de puissance imposés aux piles à combustible. Si un profil de puissance est décrit par  $n$  points et que le système comporte  $N$  systèmes pile à combustible, le nombre de variables est donc de  $n \times N$ .

---

3. L'étude a été menée en laboratoire sur une cellule ANR26650 en utilisant un profil de courant obtenu en condition réelle sur un bus hybride produit par AB Volvo. La plage d'excursion de l'état de charge imposée par le profil de courant est comprise entre 30% et 50% de la capacité de la cellule.

Les méthodes algébriques se basent sur des algorithmes permettant un balayage efficace de la totalité des solutions. Pour qu'un balayage des solutions soit envisageable, il est nécessaire que l'espace de solutions soit discrétisé. Cette discrétisation ne permet donc pas une exploration totale de l'espace de recherche mais permet, si la discrétisation est assez fine, de trouver une solution proche de l'optimum global. De plus, l'obtention de cette solution optimale pour certaines méthodes tel que la programmation dynamique est garantie au bout d'un nombre fixe d'évaluations.

Deux méthodes appartenant aux méta-heuristiques ont été retenues : l'algorithme génétique [Davis, 1991] et l'évolution différentielle [Storn et al., 1997]. Une méthode algorithmique a été retenue : la programmation dynamique [Bellman, 1954]. Le facteur clé qui a permis d'orienter le choix de la méthode est la dépendance de la convergence au nombre de variable. Pour un nombre de variable faible (inférieur à 10), les méthodes méta-heuristiques et algorithmiques permettent d'obtenir une solution proche de l'optimale en un temps acceptable. Cependant, pour des valeurs de  $n$  réalistes pour notre cas d'étude (supérieures à 100), les méthodes basées sur des méta-heuristiques ne convergent plus en un temps raisonnable alors que la programmation dynamique permet encore d'aboutir à une solution si l'on considère une discrétisation plus grossière de l'espace. Pour ces raisons, nous utiliserons donc la programmation dynamique.

#### 4.1.3.2/ PROGRAMMATION DYNAMIQUE

La programmation dynamique permet de déterminer la politique d'action optimale associée à un problème d'optimisation. Cette politique d'action optimale permet de déterminer l'action à effectuer pour obtenir un résultat optimal vis-à-vis d'une fonction de coût et des différents états dans lesquels le système pourrait se retrouver. Pour ce faire, il est nécessaire d'associer une action optimale et un coût correspondant à chaque état possible. Parmi toutes les actions possibles dans un état donné, celle qui est retenue est celle qui permet de minimiser le coût dans cet état. Ce coût dépend de l'action effectuée ainsi que de l'état dans lequel le système se retrouve après que celle-ci ait été effectuée. Ils sont obtenus grâce à la formule suivante :

$$C(x) = \min_u C(x, u) = \min_u (f(x, u) + C(x')) \quad (4.23)$$

où  $f(x, u)$  est le coût résultant de l'action  $u$  dans l'état  $x$  et  $x'$  est l'état résultant de l'action  $u$  dans l'état  $x$ , il est obtenu grâce au modèle d'état suivant :

$$x' = g(x, u) \quad (4.24)$$

Cela peut mener à une définition récursive du coût si certaines actions permettent de parcourir une boucle dans les états. Toutefois, cela n'est pas le cas dans le cadre de problèmes où le temps est une variable d'état du système car la variation de la variable temporelle est strictement croissante. Dans ce cas, le processus d'optimisation introduit par la programmation dynamique optimise les actions à effectuer en partant de l'instant



final. Pour chaque combinaison d'état possible à l'instant  $t$ , la totalité des actions possibles entre l'instant  $t$  et l'instant  $t + \Delta T$  est étudiée (où  $\Delta T$  est le pas de discrétisation temporel). Grâce à la connaissance de la politique d'action optimale entre l'instant  $t + \Delta T$  et l'instant final, il est alors possible de déterminer la politique d'action optimale entre l'instant  $t$  et l'instant final (voir figure 4.5). Ceci est possible car si la politique d'action est optimale entre  $t$  et  $t_{final}$  alors elle est optimale entre  $t + \Delta T$  et  $t_{final}$ . Ce processus est répété jusqu'à ce que la politique d'action optimale soit définie entre l'instant initial et l'instant final.

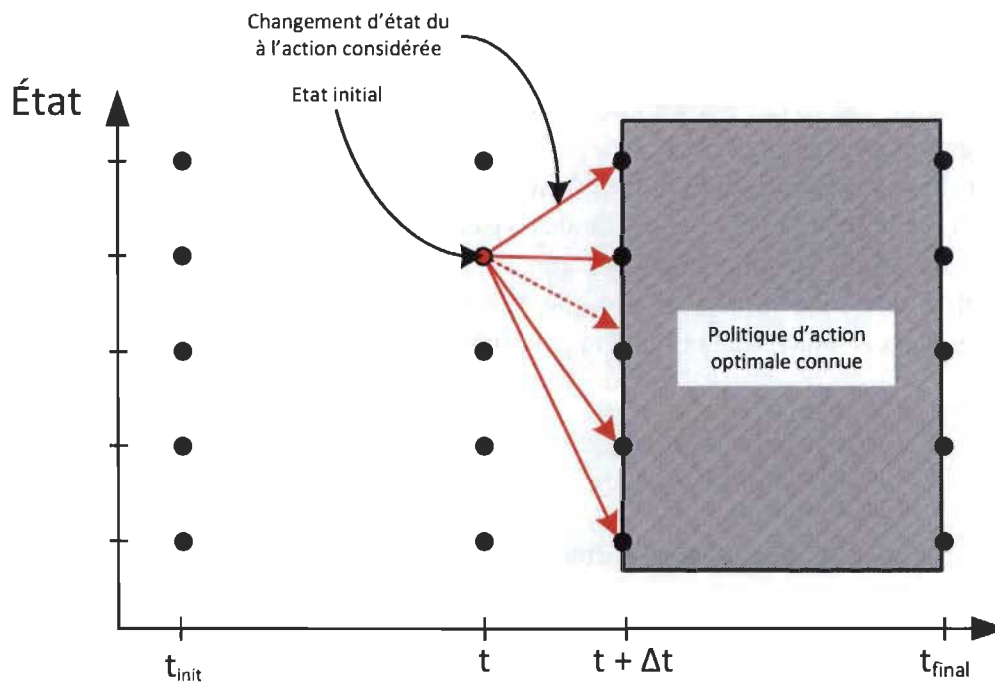


FIGURE 4.5 – Processus d'optimisation lié à la programmation dynamique

La programmation dynamique a été pensée pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire discrets mais elle peut être étendue à certains problèmes d'optimisation continus comme celui de la gestion énergétique d'un système hybride.

Afin de pouvoir être traité par la programmation dynamique il est nécessaire de discrétiser le problème d'optimisation. Cette discrétisation intervient au niveau de la description de l'état du système, des actions et de l'échelle temporelle.

Ici, l'état du système est décrit par l'instant  $t$ , le niveau de puissance fourni par les stacks à l'instant  $t$  et l'état de charge des batteries à l'instant  $t$ . En accord avec la description des profils de puissance introduite au début du chapitre, l'action est la dérivée de puissance imposée aux systèmes PAC. Finalement, la transition entre les différents états est décrite par le modèle d'état présenté dans le chapitre précédent. Il est toutefois nécessaire de simplifier les phénomènes dynamiques (tensions, pressions, courant) pour limiter le temps

de simulation et ne pas avoir à introduire la dérivée de tension, la température et la pression comme variable d'état. La fonction de coût  $f$  utilisée ici sera la suivante :

$$f(x, u) = C_{\text{énergie}}(x, u) + C_{\text{dégradation}}(x, u) \quad (4.25)$$

où les fonctions  $C_{\text{énergie}}$  et  $C_{\text{dégradation}}$  sont celles qui ont été présentées en équation (4.10 et 4.11) et restreinte ici à la plage temporelle  $[t, t + \Delta T]$ .

Le problème traité étant continu, l'état  $x'$  n'appartient pas toujours à l'ensemble des états considéré lors de la discrétisation (voir trait pointillé sur la figure 4.2a). Si ce n'est pas le cas, il est alors possible d'obtenir le coût associé en interpolant entre les états connus. L'optimalité de la trajectoire retenue n'est pas assurée. La programmation dynamique ne fournit un résultat réellement optimal que pour un problème discret. On reste toutefois proche de la solution optimale dans le cas continu si la discrétisation est assez fine.

Finalement lorsque la politique d'action est définie pour toutes les combinaisons d'états, il est possible de construire les profils de puissance optimaux. A l'état initial, la politique d'action optimale fournit la dérivée de puissance pour chacun des systèmes PAC. Après une durée  $\Delta T$ , le système se retrouve dans un nouvel état qui est associé à une nouvelle action optimale. Le processus est répété jusqu'à ce que les profils complets soient obtenus.

#### 4.1.3.3/ IMPLÉMENTATION

La discrétisation des états et des actions est définie suivant un pas fixe car la totalité de la plage de puissance est étudiée sans discrimination particulière entre les basses, moyennes et hautes puissances. Pour les mêmes raisons, l'état de charge et l'action utilisent un pas fixe pour leur discrétisation. Le temps de calcul étant directement proportionnel au nombre de combinaisons d'états et d'actions envisageables, la discrétisation doit être assez fine pour obtenir un résultat proche de l'optimum global défini par le problème d'optimisation tout en conservant un temps de calcul acceptable.

Soit respectivement  $N_t$ ,  $N_p$ ,  $N_{SoC}$  et  $N_a$  le cardinal des échantillonnages temporels, des puissances, des états de charges et des actions considérés. Le nombre de simulations à effectuer par processus d'optimisation est relié au nombre de PAC  $N$  par la formule :

$$n_{simu} = N_t(N_p N_a)^N N_{SoC} \quad (4.26)$$

Comme  $N = 4$ , les valeurs de  $N_p$  et  $N_a$  ont une influence considérable sur le temps de calcul.

La fonction de coût présentée plus haut n'est pas continue en fonction de la puissance à cause de l'impact du coût des démarrages. C'est pourquoi interpoler entre deux états peut fournir un résultat très différent de ce que l'on aurait pu obtenir avec un maillage plus fin. Pour ne pas avoir à interpoler par rapport à la puissance nous prendrons  $N_a = N_p$  et

les dérivées seront calculées de manière à ce que les puissances fournies par les piles à l'issue de la plage temporelle considérée appartiennent à la discrétisation de puissance considérée. De plus, la puissance fournie par les systèmes PAC influant directement sur l'état de charge des batteries, il est nécessaire que le pas de discrétisation de l'état de charge soit inférieur à la différence d'état de charge final entraînée par l'utilisation de deux actions différentes. Les figures 4.6a et 4.6b illustrent ces besoins.

La discrétisation temporelle intervient également à ce niveau. Des plages temporelles plus longues entraînent des variations d'état de charge plus importantes. Le paramétrage de la discrétisation est un facteur important influant sur la précision du résultat et sur le temps de calcul. Le dernier facteur à considérer est l'espace mémoire requis pour le stockage de la politique d'action optimale. L'espace mémoire requis pour la politique optimale ou la matrice de coût est défini par les formules suivantes :

$$M_{politique} = N_t(N_p)^N N_{SoC} N * M_{double} \quad (4.27)$$

$$M_{coût} = (N_p)^N N_{SoC} * M_{double} \quad (4.28)$$

Le nombre d'opérations et la quantité d'espace mémoire requise augmentant avec la finesse de la discrétisation, il n'est pas possible de réaliser cette optimisation sur une machine conventionnelle avec une discrétisation appropriée. L'utilisation du mésocentre de Franche Comté<sup>4</sup> nous permet d'avoir accès à 128 coeurs en parallèle et 512 Go de mémoire (4Go par processeur). Afin d'utiliser au mieux ces ressources, il a été nécessaire de répartir le stockage des données sur tous les processeurs utilisés. Pour simplifier le processus, il est plus avantageux que  $N_t$  et  $N_{SoC}$  soient des multiples de 128. Les valeurs choisies permettent d'avoir la discrétisation la plus fine vis-à-vis de l'espace mémoire alloué<sup>5</sup>.

TABLE 4.5 – Paramètres de discrétisation

$N_t$	128
$N_p, N_a$ pour $N = 4$ (multi-pile)	10
$N_p, N_a$ pour $N = 1$ (monopile)	40
$N_{SoC}$	512

On a donc un pas temporel de l'ordre de la dizaine de seconde et un pas d'état de charge de l'ordre de 0.04%. Le pas de puissance varie de 1kW à 2.5kW en fonction du dimensionnement considéré. Au vue des dynamiques du profil de puissance ARTEMIS qui sont de l'ordre de la seconde à la dizaine de secondes, il aurait été préférable d'avoir un pas de l'ordre de la seconde. Cela n'est toutefois pas possible avec les moyens mis en oeuvre.

4. Plus d'informations sur le mésocentre et ses capacités sur : <http://meso.univ-fcomte.fr>

5. Pour le cas monopile, il aurait été possible d'augmenter  $N_p$  et  $N_a$  mais au dela de 40 augmenter cette valeur a peu d'impact sur le résultat.

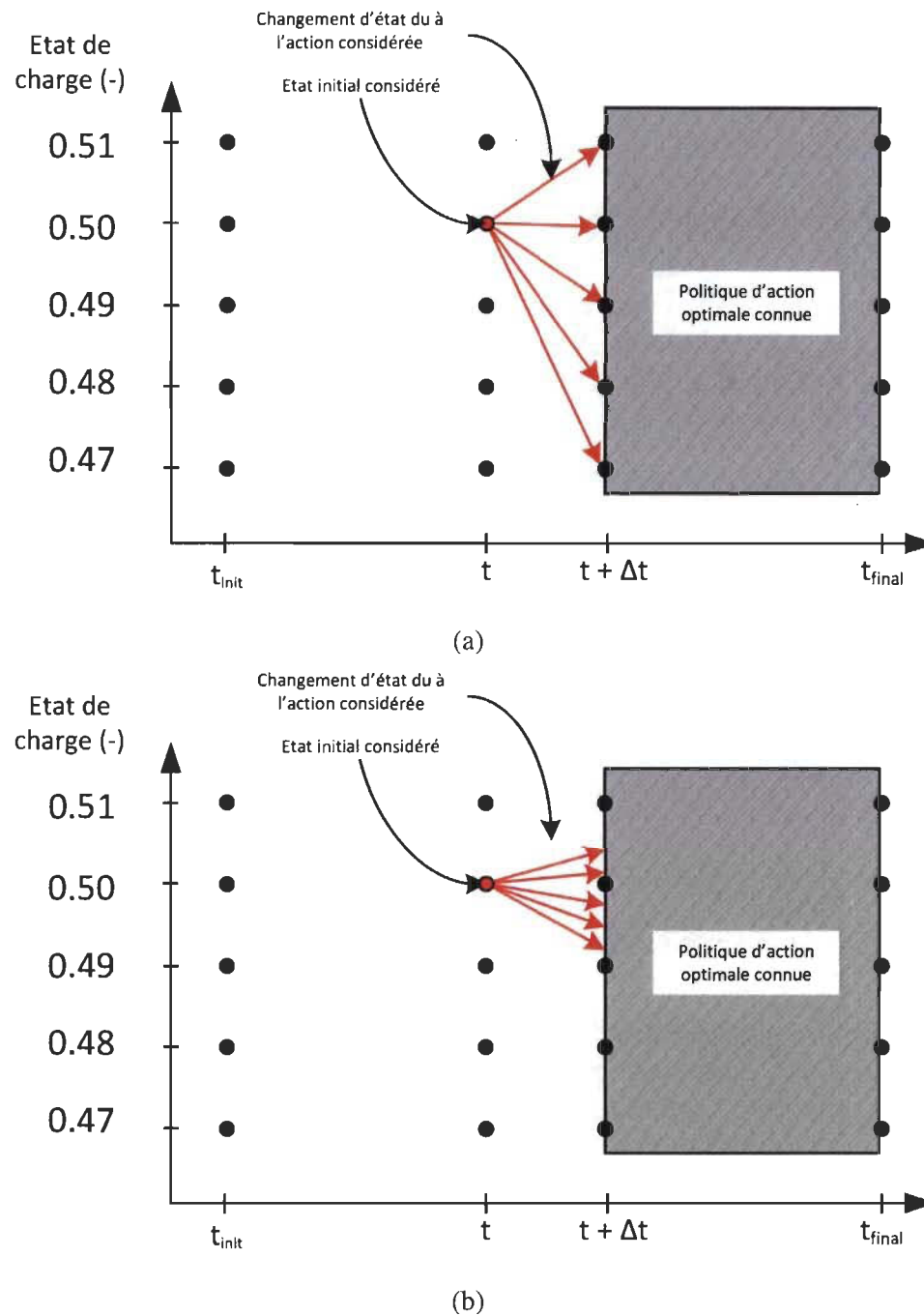


FIGURE 4.6 – (a) - cas où les discrétisations des actions et de l'état de charge permettent de faibles erreurs d'interpolation. (b) - cas où les discrétisations des actions et de l'état de charge entraînent des erreurs d'interpolation élevées

## 4.2/ RÉSULTATS D'OPTIMISATION

Le problème d'optimisation et la méthode de résolution ont été présentés. L'implémentation sur le mésocentre a permis d'obtenir les résultats présentés dans cette section. L'analyse de ces derniers permet de conclure sur la comparaison des configura-

tions mono-stack et multi-stack.

#### 4.2.1/ PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Le processus d'optimisation permet de définir les profils de puissance optimaux imposés aux systèmes piles à combustible. A l'aide de ces profils il est alors possible de déterminer l'impact sur le profil de puissance de la batterie, la dégradation des différents éléments ainsi que le coût d'exploitation du système.

##### 4.2.1.1/ PROFILS DE PUISSANCE

L'unité de puissance utilisée pour les figures représentées en per unit est la puissance totale du système pile à combustible (voir tableau 4.3). Les profils individuels pour chaque système PAC et chaque dimensionnement sont disponibles en annexe B.

##### 4.2.1.2/ CONSOMMATION, NOMBRE DE DÉMARRAGES ET DÉGRADATIONS

Les tableaux 4.6 à 4.9 présentent les valeurs des différents paramètres influant sur le coût d'exploitation. Les valeurs moyennes sont obtenues en pondérant les valeurs pour les trois cycles étudiés par leur distribution (tableau 4.1).

TABLE 4.6 – Consommation en hydrogène par cycle (en g)

Cas d'étude	urbain	rural	autoroutier	moyenne
AS (monopile)	70	183	408	111
AM (multi-pile)	70	183	409	111
BS (monopile)	87	194	411	125
BM (multi-pile)	70	182	430	111
CS (monopile)	122	227	432	160
CM (multi-pile)	74	180	421	113
DS (monopile)	164	265	460	201
DM (multi-pile)	106	232	440	150
ES (monopile)	190	293	490	227
EM (multi-pile)	92	221	454	137

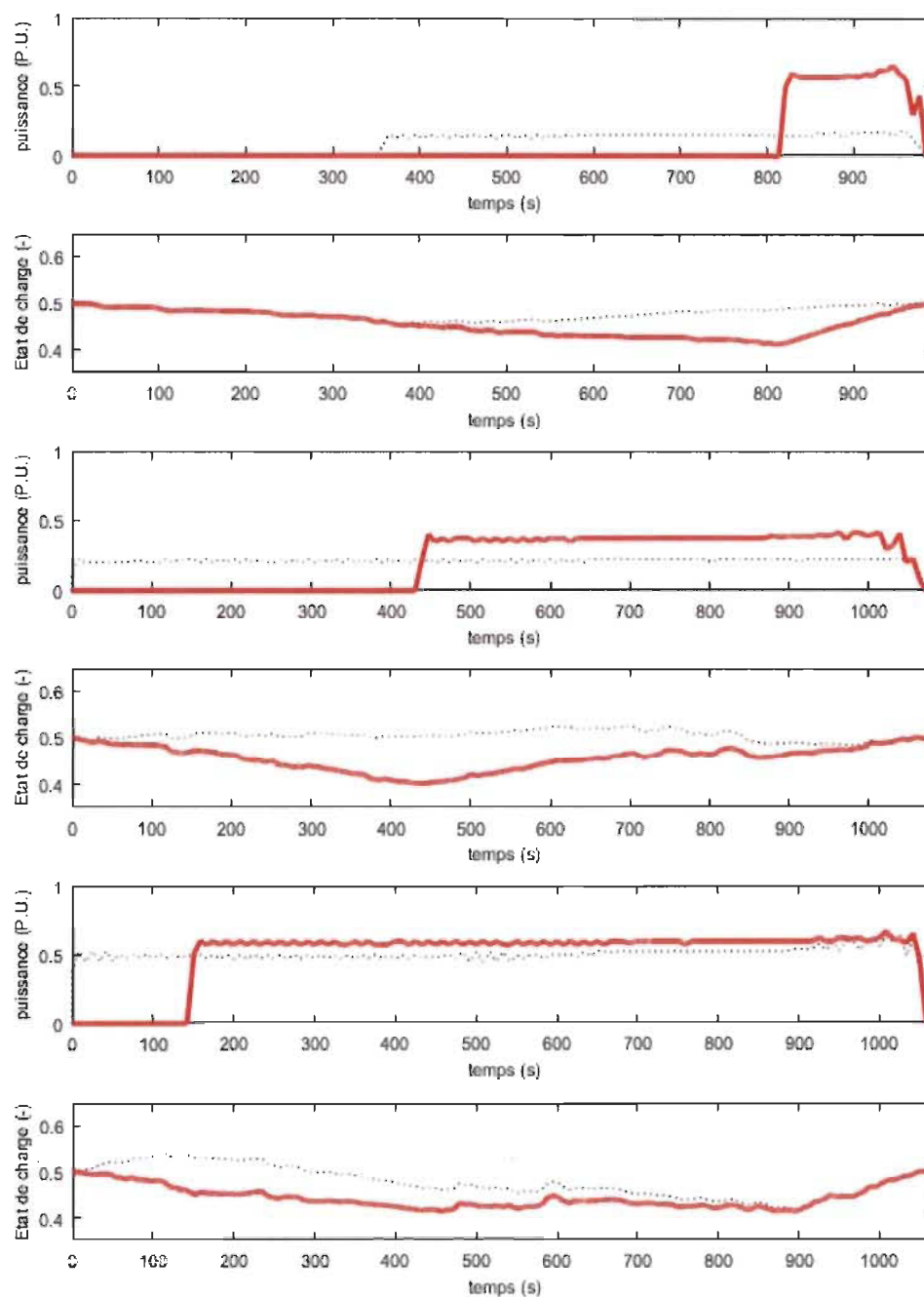


FIGURE 4.7 – Profils de puissance pile et état de charge de la batterie pour le dimensionnement A. De haut en bas : cycles urbain, rural et autoroutier. Trait fin : multi-pile, trait épais : monopile.

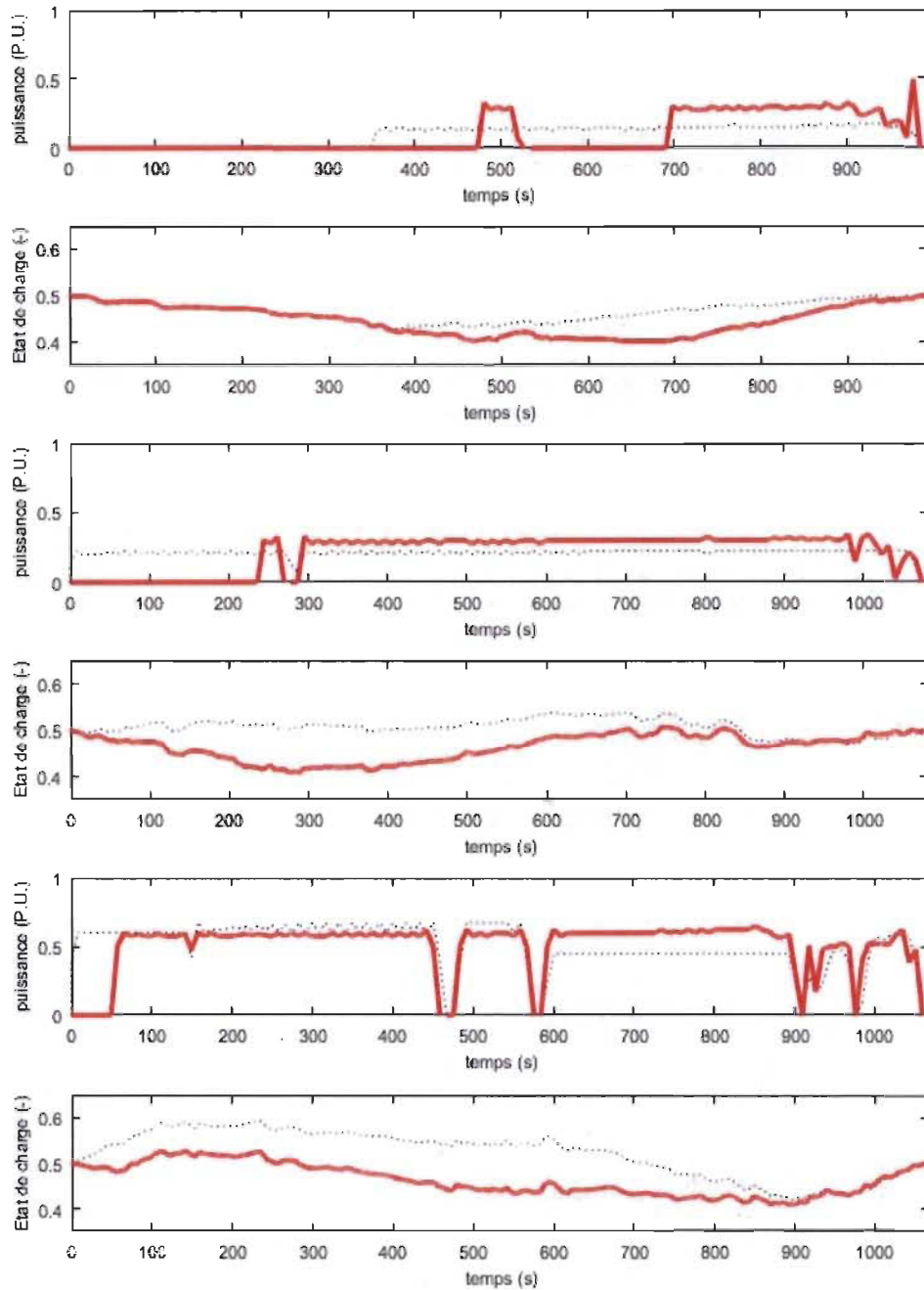


FIGURE 4.8 – Profils de puissance pile et état de charge de la batterie pour le dimensionnement B. De haut en bas : cycles urbain, rural et autoroutier. Trait pointillé : multi-pile, trait plein : monopile.



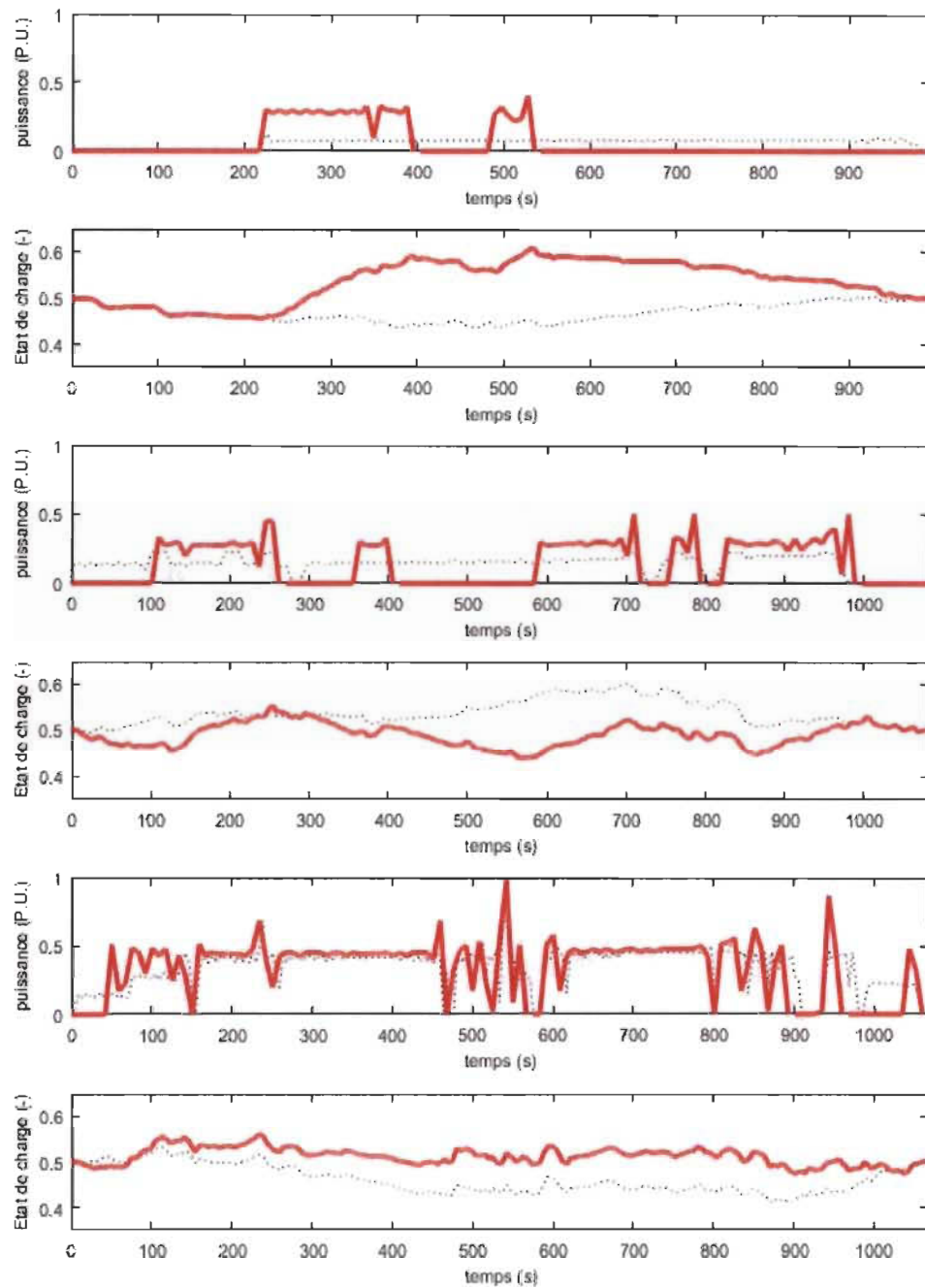


FIGURE 4.9 – Profils de puissance pile et état de charge de la batterie pour le dimensionnement C. De haut en bas : cycles urbain, rural et autoroutier. Trait pointillé : multi-pile, trait plein : monopile.



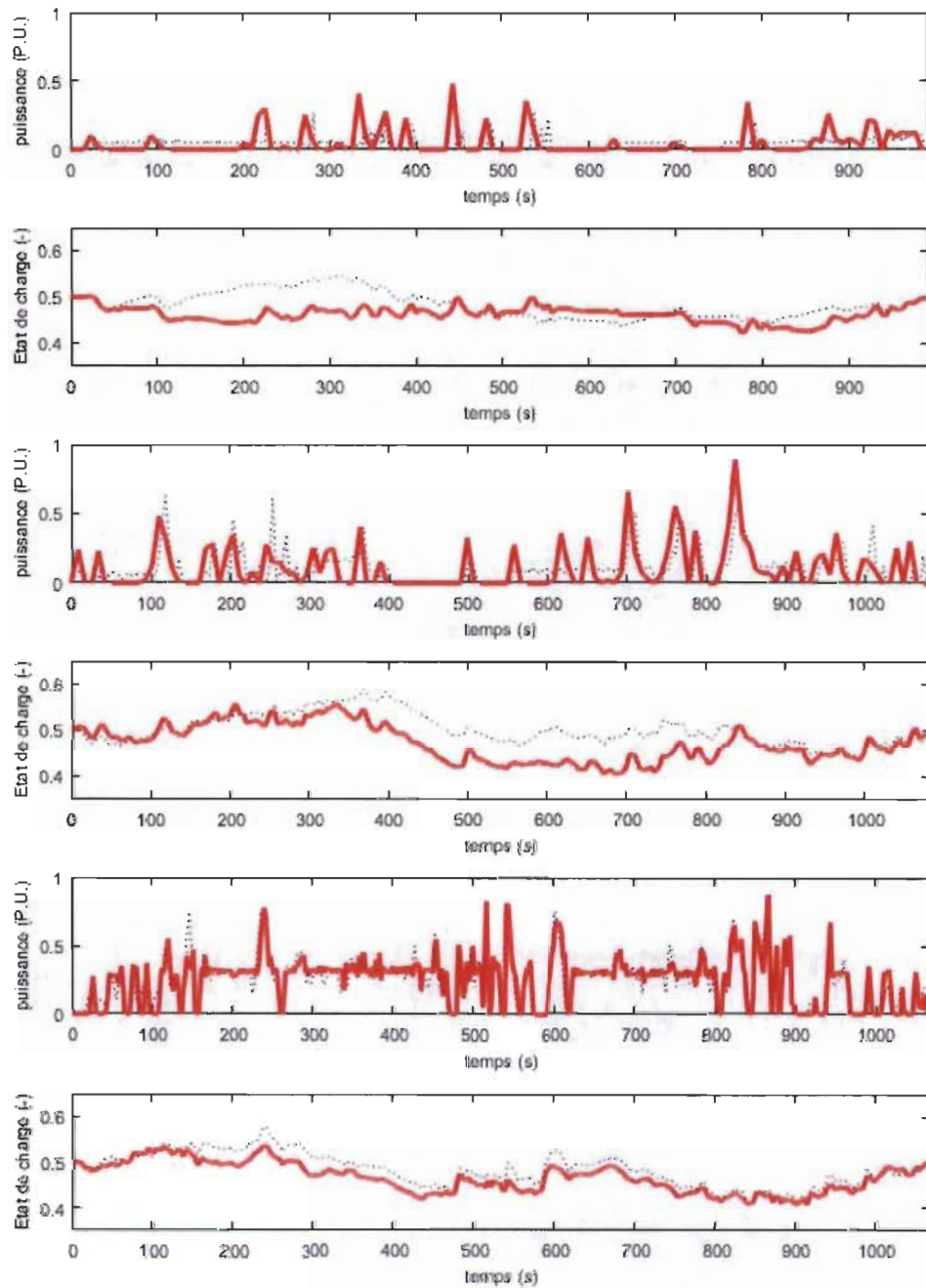


FIGURE 4.10 – Profils de puissance pile et état de charge de la batterie pour le dimensionnement D. De haut en bas : cycles urbain, rural et autoroutier. Trait pointillé : multi-pile, trait plein : monopile.

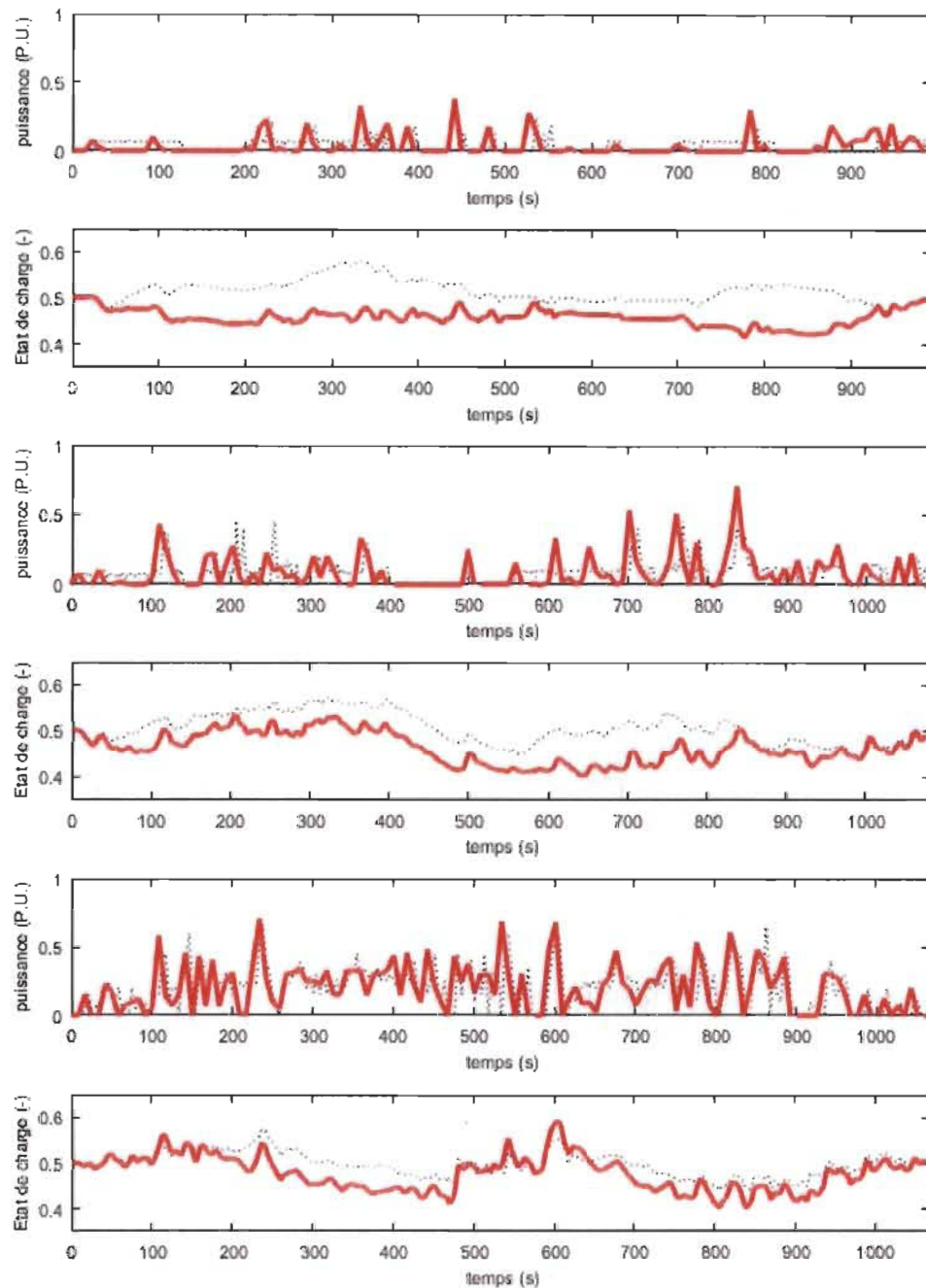


FIGURE 4.11 – Profils de puissance pile et état de charge de la batterie pour le dimensionnement E. De haut en bas : cycles urbain, rural et autoroutier. Trait pointillé : multi-pile, trait plein : monopile.

TABLE 4.7 – Dégradation des systèmes PAC par cycle (en % de durée de vie)

Cas d'étude	urbain	rural	autoroutier	moyenne
AS (monopile)	0.0257	0.0261	0.0264	0.0259
AM (multi-pile)	0.0065	0.0066	0.0191	0.00687
BS (monopile)	0.0257	0.0261	0.0264	0.0259
BM (multi-pile)	0.0065	0.0066	0.0191	0.00687
CS (monopile)	0.0261	0.0263	0.0264	0.0262
CM (multi-pile)	0.0065	0.0066	0.0191	0.00690
DS (monopile)	0.0263	0.0265	0.0264	0.0264
DM (multi-pile)	0.0128	0.0191	0.0191	0.0147
ES (monopile)	0.0264	0.0265	0.0265	0.0264
EM (multi-pile)	0.0065	0.0129	0.0191	0.00867

TABLE 4.8 – Dégradation de la batterie par cycle (en % de durée de vie)

Cas d'étude	urbain	rural	autoroutier	moyenne
AS (monopile)	0.00155	0.00248	0.00306	0.00185
AM (multi-pile)	0.00131	0.00219	0.00319	0.00161
BS (monopile)	0.00232	0.00378	0.00476	0.00279
BM (multi-pile)	0.00218	0.00365	0.00500	0.00266
CS (monopile)	0.00348	0.00604	0.00729	0.00429
CM (multi-pile)	0.00317	0.00536	0.00664	0.00385
DS (monopile)	0.00682	0.0119	0.0110	0.00834
DM (multi-pile)	0.00572	0.00981	0.0125	0.00703
ES (monopile)	0.00682	0.0120	0.0165	0.00852
EM (multi-pile)	0.00561	0.00936	0.0126	0.00683

TABLE 4.9 – Nombre de démarrages pour les systèmes multi-pile

Cas d'étude	urbain	rural	autoroutier	moyenne
AM	1	1	3	1.06
BM	1	1	3	1.06
CM	1	1	3	1.06
DM	2	3	3	2.30
EM	1	2	3	1.33

TABLE 4.10 – Coût total optimal par cycle (en \$)

Cas d'étude	urbain	rural	autoroutier	moyenne
AS (monostack)	0.490	0.752	1.222	0.583
AM (multi-pile)	0.257	0.511	1.143	0.352
BS (monostack)	0.524	0.769	1.225	0.611
BM (multi-pile)	0.257	0.509	1.181	0.352
CS (monostack)	0.754	1.001	1.428	0.841
CM (multi-pile)	0.304	0.544	1.266	0.397
DS (monostack)	1.001	1.238	1.621	1.084
DM (multi-pile)	0.555	0.983	1.413	0.696
ES (monostack)	1.212	1.454	1.557	1.297
EM (multi-pile)	0.416	0.884	1.557	0.576

#### 4.2.2/ ANALYSE

L'analyse de ces résultats portera premièrement sur le comportement imposé par les profils de puissance obtenus et deuxièmement sur le coût d'exploitation qu'ils engendrent.

##### 4.2.2.1/ COMPORTEMENT

Les profils de puissance présentés en figure 4.7 - 4.11 et leur distribution en puissance (figure 4.12 et 4.13) nous permettent de déterminer le comportement optimal du système en fonction du dimensionnement.

Les résultats présentés dans le tableau 4.9 reflètent que le nombre de système PAC est le minimum permettant de fournir soit la puissance moyenne soit la différence entre la puissance maximale du cycle et la puissance maximale que les batteries peuvent fournir. La deuxième condition<sup>6</sup> n'affecte pas les dimensionnements monopile et n'affecte que les dimensionnements multi-pile à bas taux d'hybridation (cas C, D et E).

Pour ce qui est du profil de puissance, on se rend compte grâce aux figures 4.12 et 4.13 que plus le taux d'hybridation est faible, plus le spectre des puissances imposées aux pile à combustible est étendu. Pour les dimensionnement à fort taux d'hybridation, le profil de puissance impose un fonctionnement proche du point de rendement maximal alors que pour les dimensionnement à faible taux d'hybridation le point de fonctionnement est plutôt imposé par les contraintes de puissance du problème d'optimisation.

Lorsque plusieurs systèmes PAC sont démarrés, les profils de puissance pour chacune de ces PACs sont identiques ou très similaires. La seule exception à cette règle étant le résultat d'optimisation dans le cas d'un profil rural pour le dimensionnement D. Ici, les

6. Contrainte sur les limites inférieures et supérieures de puissance des sources

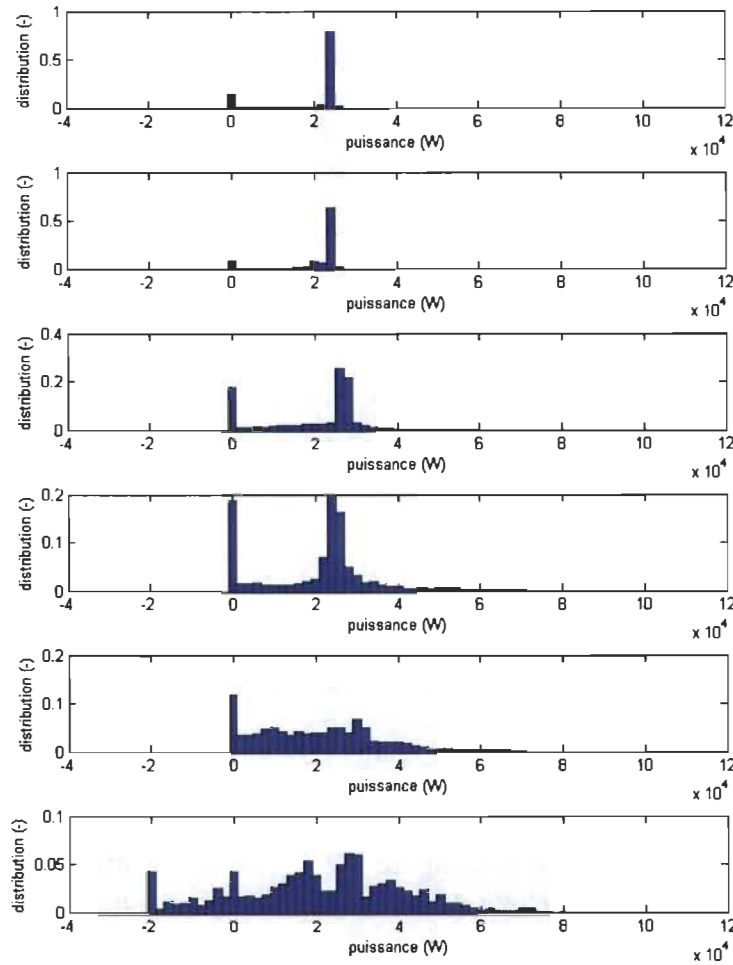


FIGURE 4.12 – Histogramme des valeurs de puissances pour les profil optimaux pour chaque dimensionnement dans le cadre du cycle autoroutier - systèmes monopile. Du haut vers le bas : cas d'étude AS, BS, CS, DS, ES et profil de charge.

systèmes PAC 2 et 3 sont démarrés uniquement pour répondre à des besoins en puissance transitoire.

Le comportement imposé par la gestion énergétique optimale est en somme très dépendant du cycle de conduite et du dimensionnement. Toutefois certaines grandes lignes peuvent être identifiées, le nombre de système PAC devant être démarré doit correspondre aux minimum nécessaire pour fournir l'énergie demandée par le cycle et il est nécessaire de fonctionner au plus proche du point de rendement maximal en conservant le respect des contraintes de puissance.

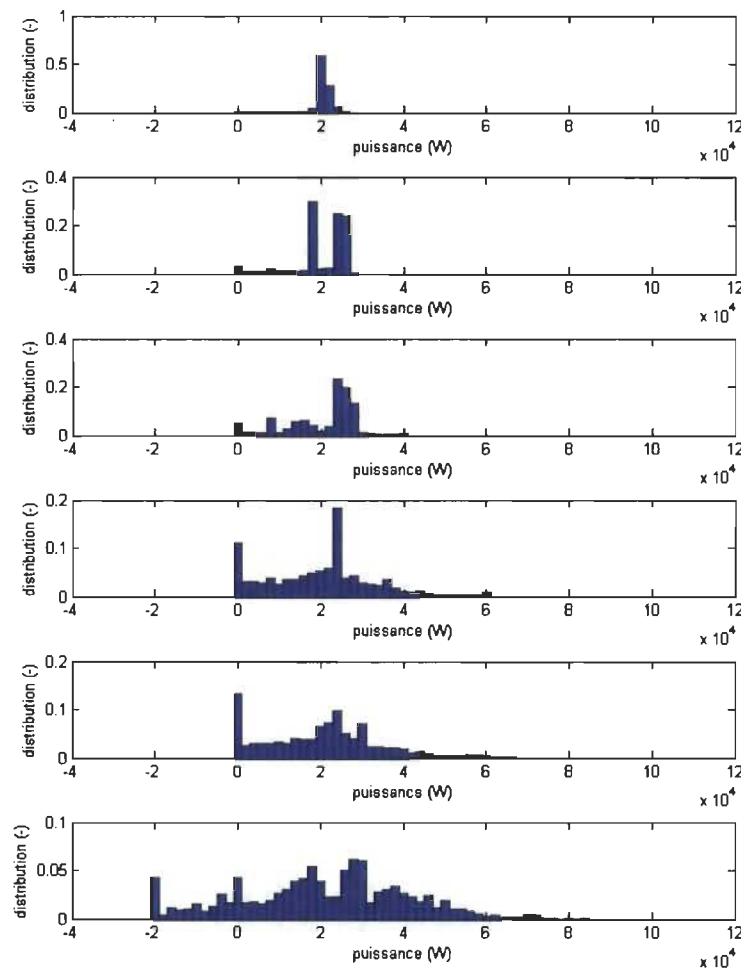


FIGURE 4.13 – Histogramme des valeurs de puissances pour les profil optimaux pour chaque dimensionnement dans le cadre du cycle autoroutier - systèmes multi-pile. Du haut vers le bas : cas d'étude AM, BM, CM, DM, EM et profil de charge.

#### 4.2.2.2/ COUT D'EXPLOITATION ET DÉGRADATION

Les résultats présentés dans les tableaux 4.6 - 4.10 permettent de calculer les coûts d'exploitation pour chaque cas d'utilisation. La figure 4.14 offre une représentation graphique de ce coût d'exploitation et de sa composition en fonction du cas d'étude. Les valeurs numériques obtenues étant fortement liées aux paramètres de coût et de dégradation choisis, il est plus objectif de considérer l'écart relatif entre les différents cas étudiés dans ce chapitre.

Les résultats présentés indiquent un avantage assez net pour les systèmes multi-pile par rapport aux systèmes monopile quelque soit le dimensionnement considéré. Cet écart va-



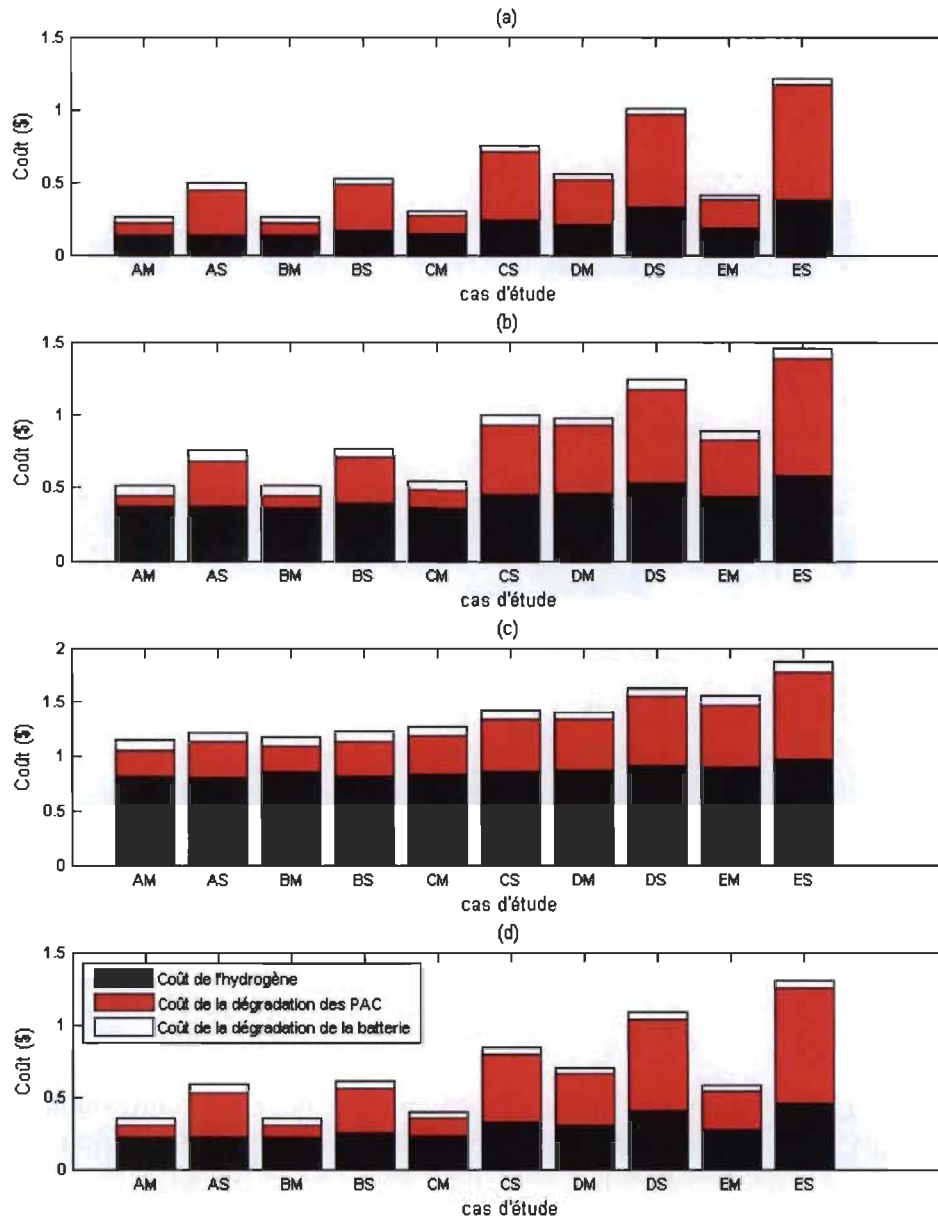


FIGURE 4.14 – Répartition du coût moyen en fonction du dimensionnement. Du haut vers le bas : cycle urbain, rural, autoroutier et moyenne pondérée des trois cycles.

rie toutefois vis-à-vis du profil de conduite considéré. Ainsi l'écart est le plus important pour le cycle urbain et le plus faible pour le cycle autoroutier. Cet écart s'explique principalement par le fait qu'il n'est pas nécessaire de démarrer la totalité des systèmes PAC dans le cas multi-pile et pour des profils d'usage urbains ou ruraux. Le coût de la dégradation des systèmes PAC s'en retrouvant plus faible.

Les dimensionnements à fort taux d'hybridation offrent un coût d'exploitation moyen plus

faible que ceux possédant un taux d'hybridation faible. Ceci s'explique en grande partie par le coût plus important des systèmes PAC alors que les taux de dégradation restent similaires.

La consommation en hydrogène des systèmes monopiles et multi-piles sont similaires pour les dimensionnements à forts taux d'hybridation. Ceci s'explique par le fait que les systèmes à fort taux d'hybridation sont sollicités principalement à rendement maximum sur la majorité du cycle et que les rendements maximums des systèmes monopile et multi-pile sont égaux.

Pour ce qui est des systèmes à faible taux d'hybridation, les systèmes multi-piles sont avantagés car le profil qui leur est imposé balaye une large plage de puissance et que leur rendement à faible puissance est plus élevé que celui des systèmes monopiles.

Finalement, on peut noter que quelque soit le cas d'étude considéré le coût de la dégradation de la batterie reste négligeable par rapport aux autres coûts mis en jeu.

#### 4.3/ CONCLUSION

Les résultats d'optimisation de la gestion énergétique permettent de caractériser le comportement optimal à adopter en fonction du dimensionnement et du cycle de conduite. De plus ces résultats permettent également de mettre au clair un net avantage des solutions multi-pile par rapport aux solution monopile en terme de coût d'exploitation. Il est nécessaire de noter également l'avantage des systèmes à forts taux d'hybridation par rapport à ceux possédant un faible taux d'hybridation.

Au vu des modèles de comportement énergétique et de dégradation considérés, les résultats d'optimisation indiquent que la minimisation de la puissance du système PAC permet d'obtenir de meilleurs performances. Ainsi par extension, si les contraintes d'états de charges n'étaient plus présentes, on se dirigerait vers des solutions sans pile à combustible. Néanmoins, les autres atouts des systèmes PAC tels que le temps de recharge ou l'autonomie rendent intéressantes à l'heure actuelle les solutions hybrides. De plus, ce constat est uniquement valide pour les paramètres de coût et les modèles considérés.

Finalement, les résultats présentés ici sont très dépendant des hypothèses considérées vis-à-vis du paramétrage des modèles de comportement énergétique et du vieillissement. De plus, les courbes de rendement considérés dans cette étude diffèrent de celle rencontrées couramment dans la littérature. En effet, le rendement maximal d'un système PAC usuel est plus généralement atteint entre 30% et 40% de sa puissance maximale.

Afin de maximiser le rendement, il pourrait alors être judicieux de démarrer plus de système PAC que ce qu'imposerait la fourniture de la charge moyenne. Toutefois, d'un point de vue global, il serait alors question de comparer le gain en consommation d'hydrogène obtenu à la perte en durée de vie engendrée.

Toutefois, ces résultats ayant été obtenus hors ligne avec la connaissance complète du



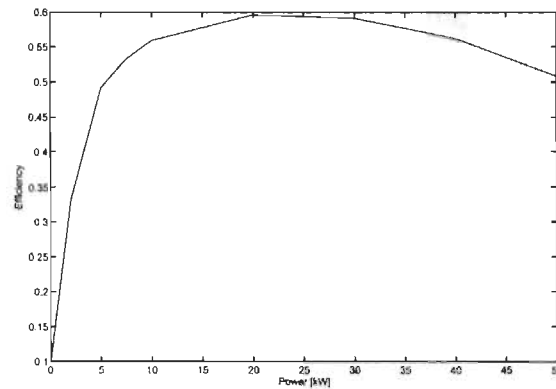


FIGURE 4.15 – Rendement d'un système PAC usuel [Basualdo et al., 2012]

profil de conduite, il ne permettent que de déterminer une limite inférieure au coût d'utilisation. Il ne reflète donc pas forcément les résultats que l'on pourrait obtenir à l'aide d'une stratégie de gestion en ligne. Le chapitre suivant abordera donc la conception d'une stratégie de gestion se basant en partie sur la caractérisation du comportement optimal obtenu dans ce chapitre.

## STRATÉGIE DE GESTION ÉNERGÉTIQUE EN LIGNE

L'exploitation en temps réel d'un système multi-source possédant un ou plusieurs systèmes de stockage énergétique requiert l'utilisation et donc la conception d'une stratégie de gestion énergétique en ligne. Dans ce chapitre, nous présenterons une stratégie conçue pour un système PAC multi-pile hybridé à une batterie puis les résultats de simulation associés à son utilisation.

Les outils fournis par la littérature scientifique pour réaliser cette tâche sont les outils de gestion énergétique usuels. La particularité du cas étudié ici est que le système considéré n'est pas fixé mais dépend du nombre système PAC ayant été démarré. Une liste des outils disponibles est présentée dans le tableau 5.1. Il existe des méthodes déterministes et des méthodes stochastiques. Parmi les outils disponibles, la plupart sont basés sur l'expertise du concepteur car ils nécessitent la conception de règles ou d'une fonction objectif pour l'optimisation (stochastique ou non).

TABLE 5.1 – Méthodes adaptées aux stratégies de gestion énergétiques

Méthode	Adaptation au parcours	Charge de calcul	Aptes aux décisions binaires	Complexité de conception	Références
Règle logique	Moyenne	Faible	Oui	Élevé	[Jalil et al., 1997]
Logique floue	Moyenne	Faible	Oui	Moyenne	[Schouten et al., 2003]
Programmation dynamique	Aucune	Élevé	Oui	Faible	[Brahma et al., 2000]
Problème de décision de Markov	Élevé	Très Élevé	Oui	Faible	[Qiu et al., 1999]
Méthodes basées sur l'optimisation	Faible	Faible	Non	Faible	[Musardo et al., 2005]

Toutefois, les stratégies de gestion existantes ne permettent pas directement de prendre avantage de la problématique discontinue associée au démarrage des systèmes PAC multi-piles. En effet la plupart des systèmes considérés par la mobilité électrique ne rencontre pas cette problématique. Il semble alors nécessaire de concevoir une stratégie de gestion énergétique spécifique pour traiter cette problématique.

## 5.1/ PROPOSITION DE STRATÉGIE DE GESTION ÉNERGÉTIQUE

La stratégie de gestion énergétique détermine la puissance que chaque source doit fournir. Ce processus est soumis à des contraintes et est évalué en fonction du coût d'exploitation qui résultera de son utilisation. L'avantage du système multi-pile à combustible par rapport au système pile à combustible classique découle de la possibilité de n'utiliser qu'une partie du système au lieu de sa totalité en faisant varier le nombre de systèmes PAC en fonctionnement.

La gestion énergétique doit à la fois gérer le nombre de système PAC à démarrer ainsi que leur niveau de puissance respectif. La stratégie de gestion présentée dans ce chapitre traitera ces deux problématiques séparément et effectue la répartition de la demande en puissance en considérant les objectifs suivants :

- Minimiser le coût d'exploitation du système (hydrogène et dégradation des sources).
- Maximiser la quantité d'énergie disponible à la fin du cycle (sous forme d'hydrogène et stockée dans la batterie).
- Respecter les contraintes en puissance et d'état de charge imposées au système.

### 5.1.1/ DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE DE GESTION ÉNERGÉTIQUE

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que le comportement de la gestion énergétique optimale dépend du parcours effectué par le véhicule. Dans le but de conserver des performances proches de celles affichées par la gestion optimale, il sera nécessaire d'identifier le trajet en cours. Afin d'identifier le parcours en cours nous le comparerons à des profils de références permettant de caractériser les trajets effectués régulièrement par l'utilisateur. Dans le cadre de cette étude, nous supposerons que ces profils de référence sont les profils de conduite ARTEMIS mais la méthode peut être extrapolé à tout cycle d'usage régulièrement adopté par l'utilisateur. Les cycles de conduite effectués peuvent alors appartenir à l'une des 3 familles représentées par les trajets de références ARTEMIS mais peuvent aussi être inconnus.

En se basant sur une connaissance imparfaite du cycle de conduite (probabilité d'appartenance à une famille de trajet type), il sera alors question de déterminer si il est nécessaire ou non de démarrer une pile supplémentaire en prenant en compte les conditions d'opérations, les états de charge des différentes sources et les objectifs cités plus hauts.

Finalement, la stratégie proposée détermine les niveaux de puissances attribués à chaque PAC en fonctionnement. Cette attribution permet de satisfaire les objectifs de la stratégie de gestion énergétique définis précédemment.

Ces trois étapes (figure 5.1) étant indépendantes elles seront développées sous forme de

module. Les techniques utilisées pour chacun de ces modules seront présentées dans les sections suivantes.

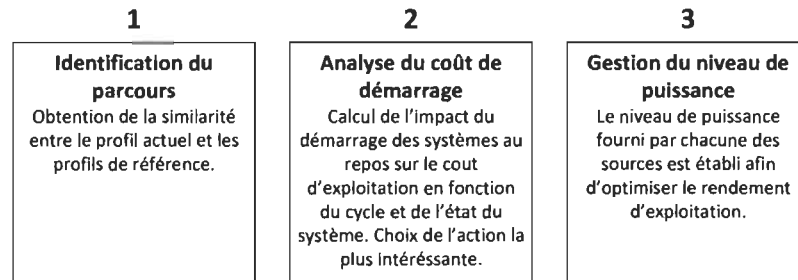


FIGURE 5.1 – Les 3 modules de la stratégie de gestion énergétique présentée

### 5.1.2/ IDENTIFICATION DU PARCOURS DE CONDUITE

La problématique abordée pour ce premier module est celle de l'identification de la famille de trajets auquel le trajet en cours appartient. Comme présenté précédemment, nous supposons que le cycle peut appartenir à trois familles de trajet ou peut être inconnu. C'est un problème de classification qui a déjà été abordé dans la littérature [Yi et al., 2009] [Liang et al., 2009] [Wang et al., 2011]. Contrairement aux travaux présentés dans la littérature, il n'est pas question d'identifier le type de conduite en cours mais bien de déterminer si le cycle en cours correspond à un parcours effectué souvent auparavant.

Dans cette étude, seule la portion effectuée du trajet est connue. Afin de conserver l'incertitude sur le reste du trajet, ce module fournit les probabilités d'appartenance à chaque famille. Le cycle peut ne pas appartenir aux familles représentatives. Dans ce cas, il sera considéré comme inconnu. Si le cycle est connu (événement  $C$ ) il est alors nécessaire de préciser quelles sont ses probabilités d'appartenance à chacune des familles représentatives. La probabilité d'appartenance à une famille connue ( $f_i$ ) est alors déterminée en se basant sur les probabilités conditionnelles :

$$P(f = f_i) = P(C)P(f = f_i|C) \quad (5.1)$$

La probabilité conditionnelle  $P(f = f_i|C)$  est déterminée à partir de la méthodologie suivante :

Premièrement, le type de conduite en cours est identifié. Celui-ci appartient aux catégories urbaines, rurales ou autoroutières. La discrimination entre les différents types de conduite est fonction de la vitesse :

$$\kappa(c, x) = \begin{cases} 0 & \text{si } V(c, x) = 0 \\ 1 & \text{si } 0 < V(c, x) \leq 60 \text{ (Conduite urbaine)} \\ 2 & \text{si } 60 < V(c, x) \leq 100. \text{ (Conduite rurale)} \\ 3 & \text{si } 100 < V(c, x) \leq 150. \text{ (Conduite sur autoroute)} \end{cases} \quad (5.2)$$

Où  $\kappa$  est le type de conduite en cours,  $c$  est la dénomination du cycle considéré et  $x$  est la variable de position dans le cycle. L'évolution du type de conduite pour les 3 cycles de références est présentée en figure (5.2).

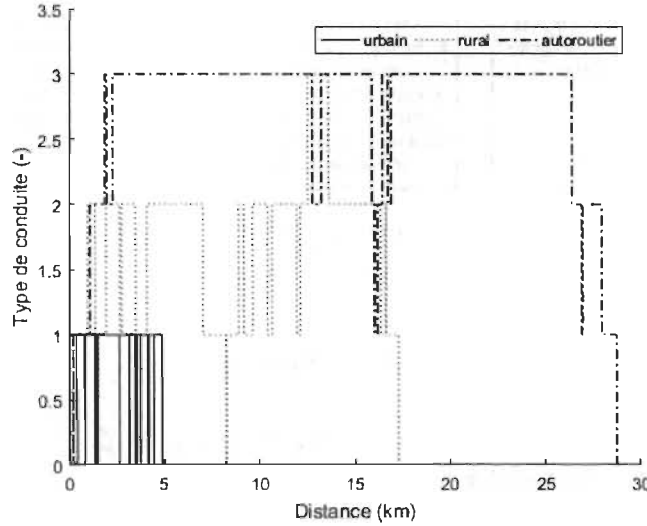


FIGURE 5.2 – Evolution du type de conduite pour les trois cycles de références

Ensuite, le type de conduite du profil en cours est comparé à celui du profil de référence afin de quantifier la similarité entre le cycle en cours ( $c$ ) et le cycle de référence ( $c_f$ ). La similitude est alors définie par la proportion du cycle parcouru présentant une évolution du type de conduite similaire à celle du profil de référence. Si la fonction  $s$  est définie telle que :

$$s(c, c_f, x) = \begin{cases} 1 & \text{si } \kappa(c, x) = \kappa(c_f, x) \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (5.3)$$

Alors la similarité ( $S(c, c_f, d)$ ) entre le cycle en cours ( $c$ ) et le cycle de référence de la famille  $f$  ( $c_f$ ) est définie par la formule suivante :

$$S(c, c_f, d) = \int_{x=0}^d s(c, c_f, x) dx \quad (5.4)$$

Ainsi plus la similarité est élevée plus le cycle ressemble au cycle représentatif. La discrimination du cycle dépend de l'ensemble des valeurs de similarité attribuées à chacune des familles. Si une des valeurs est plus importantes que les autres, la probabilité que le cycle appartienne à cette famille doit être plus élevé. Afin de respecter cette règle, la fonction softmax introduite dans [Bishop, 2006] pour résoudre les problèmes de classification est adoptée :

$$P(f = f_i|C) = \text{softmax}(S(c, c_{f_i}, d)) = \frac{e^{S(c, c_{f_i}, d)}}{\sum_{f' \in \Sigma_f} e^{S(c, c_{f'}, d)}} \quad (5.5)$$

où  $\Sigma_f$  est l'ensemble des familles de cycle de conduite.

Pour déterminer la probabilité d'appartenance il est nécessaire d'établir la probabilité que le cycle n'appartiennent à aucune famille connue. L'indicateur choisi pour caractériser cet événement est le suivant :

$$\bar{S}(c, d) = 1 - \max_{f' \in \Sigma_f} S(c, c_{f'}, d) \quad (5.6)$$

Plus cet indicateur est élevé plus le cycle en cours est différent de l'ensemble des cycles représentatifs. Il est nécessaire que la probabilité soit donc une fonction croissante de ce paramètre. La fonction choisie ici est décrite dans l'équation suivante :

$$P(C) = \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{\bar{S}(c, d)}{k} - 0.4\right)/0.1}} \quad (5.7)$$

La figure (5.3) présente l'allure de cette fonction.

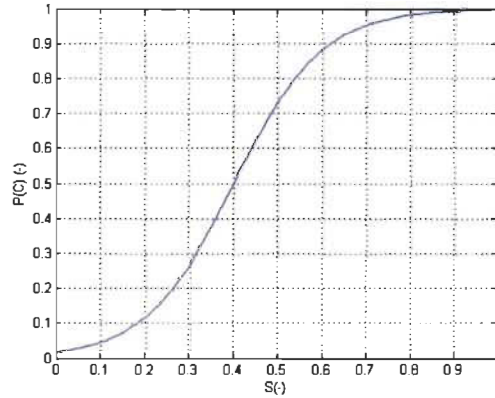


FIGURE 5.3 – Fonction sigmoïde utilisée

Cette fonction permet d'apporter moins d'importance aux faibles valeurs de  $\bar{S}$  et plus d'importance aux fortes valeurs. Les différences mineures au niveau de la conduite n'induisent donc pas une probabilité considérable que le profil de conduite en cours soit inconnu. Toutefois, une erreur supérieure à 40% est pénalisée plus fortement et indique une probabilité élevée que le profil ne fasse pas partie des familles connues. Les valeurs numériques des constantes affichées dans l'équation (5.7) ont été déterminées arbitrairement par l'intermédiaire d'un raisonnement essai-erreur dans le but d'obtenir une meilleure identification de la famille auquel le profil appartient.

### 5.1.3/ GESTION DU DÉMARRAGE DES SYSTÈMES PILE À COMBUSTIBLE

Afin de limiter la dégradation et d'augmenter le rendement du système multi-PAC, il est possible de ne pas mettre en route la totalité des systèmes PAC. Le second module de la stratégie de gestion énergétique a pour but de déterminer le nombre de systèmes PAC à démarrer en fonction des conditions d'utilisation. Ces dernières sont l'état de charge du pack batterie ( $SOC_{bat}$ ), l'avancement dans le cycle ( $t$ ) et le nombre de systèmes pile à combustible en fonctionnement( $n$ ).

Dans la suite de ce document, nous regrouperons ces variables dans un vecteur d'entrée  $X$  défini tel que :

$$X = \{SOC_{bat}, t, n\} \quad (5.8)$$

A partir de ces indicateurs, plusieurs outils peuvent remplir la mission requise. Nous retrouverons les méthodes déterministes telles que la logique floue, les règles logiques ou l'optimisation en temps réel. Nous retrouverons également les méthodes statistiques telles que la théorie de décision bayésienne [Berger, 2013] ou le processus de décision Markovien [Puterman, 2014].

Les méthodes déterministes se basent principalement sur l'expertise du concepteur et ne s'adaptent pas toujours facilement aux spécificités de l'application considérée. De plus, la connaissance du vecteur d'entrée n'est pas parfaite (profil inconnu). C'est pourquoi nous nous orienterons sur une méthode stochastique offrant un grand degré d'adaptabilité et ne dépendant que très peu de l'expertise du concepteur. Parmi les méthodes respectant ces conditions, la théorie de décision bayésienne est fortement adaptée à la prise de décision est apparait donc comme l'outil le plus efficace en considérant l'approche choisie.

#### 5.1.3.1/ THÉORIE DE DÉCISION BAYÉSIENNE

La théorie de décision bayésienne est une méthode stochastique permettant de déterminer le risque associé aux actions envisageables. Nous noterons  $a$  l'action envisagée et  $A$  l'ensemble des actions. Les actions considérés ici sont le démarrage de 0 ou plusieurs piles. L'estimation du cout de l'action étant dépendante du cycle considéré, il est nécessaire de le définir pour chaque famille de parcours ( $C(a, f_i, X)$ ). La méthodologie appliquée pour le calcul est présentée dans la section suivante.

Finalement, le risque  $r(a, X)$  associé à l'action  $a$  dans l'état  $X$  est alors :



$$r(a, X) = \sum_{f_i \in \Sigma_f} \left( \left( C(a, f_i, X) - \min_{a \in A} C(a, f, X) \right) P(f = f_i) \right) + \left( C(a, \text{inconnu}, X) - \min_{a \in A} C(a, \text{inconnu}, X) \right) P(\bar{C}) \quad (5.9)$$

L'action choisie est alors celle qui permet de minimiser le risque parmi l'ensemble des actions.

### 5.1.3.2/ ÉVALUATION DES COÛTS

L'évaluation du coût associé à l'action  $a$  lorsque le cycle appartient à la famille  $f_i$  est déterminé en faisant l'hypothèse que le restant du cycle en cours sera identique à celui du cycle représentatif de la famille  $f_i$ . Ce coût sera déterminé par simulation.

L'action  $a$  est effectuée à l'instant initial de la simulation. Au cours du reste de la simulation, les autres actions envisageables peuvent être effectuées. Afin d'obtenir le coût d'exploitation optimal en fonction des autres actions envisageables, un processus d'optimisation par algorithme génétique est utilisé. Les variables considérées au sein de ce processus d'optimisation sont les instants auxquels les autres actions seront utilisées ( $t_1, \dots, t_{n'}$ ) où le nombre d'action à considérer est  $n' = N - n$ . Le problème d'optimisation considéré est le suivant :

Problème d'optimisation	
	$C(a, f_i, X) = \min_{t_1, \dots, t_{n'}} f'(t_1, \dots, t_{n'}) \quad (5.10)$
sous contraintes :	
	$\forall i \in \{1, n'\}, \quad t_{init} \leq t_i \leq t_{max} \quad (5.11)$
	$\forall t \in [t_{init}, t_{max}], \quad SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (5.12)$

où  $f'$  est définie telle que :

$$f'(\mathbf{t}) = c_1 \left( m_{H_2}(\mathbf{t}) - \frac{(SOC_f - SOC_{init}) C_{bat} V_{bat}}{\eta_{c,max} LHV} \right) + c_2 \Delta_{MPAC}(P) + c_3 \Delta_{BAT}(P) \quad (5.13)$$

où  $\mathbf{t} = [t_1, \dots, t_{n'}]$ .

Ce problème d'optimisation est résolu par un algorithme génétique.

### 5.1.3.3/ CAS DU PROFIL INCONNU

Lorsque le profil est inconnu, le processus est similaire au cas précédent à l'exception que le profil de puissance de référence (lié au cycle de conduite de référence) est remplacé par un profil de puissance constant dont la puissance est définie comme étant la puissance moyenne observée sur les 100 dernières secondes du cycle en cours.

### 5.1.4/ GESTION DU NIVEAU DE PUISSANCE

La gestion du niveau de puissance s'effectue en deux étapes : le niveau de puissance fourni par l'ensemble du système PAC multi-pile est déterminé. Ensuite, il faut répartir cette puissance entre les différents systèmes PAC.

#### 5.1.4.1/ PUISSANCE FOURNIE PAR LE SYSTÈME PAC MULTI-PILE

Dans cette partie nous considérerons que le nombre de systèmes PAC en fonctionnement ( $n$ ) est connu. Nous déterminerons alors le niveau de puissance que chacun des systèmes devra fournir.

La programmation dynamique stochastique requiert un modèle stochastique du comportement du véhicule sur la mission en cours. Le comportement du véhicule étant fortement dépendant de facteurs imprédictibles ce ne sera donc pas le choix retenu ici.

Ici, nous considérerons une méthode déterministe basée sur l'optimisation en temps réel de type ECMS (equivalent consumption minimization strategy). Nous chercherons à optimiser en temps réel le coût d'exploitation par unité de temps défini par la fonction objectif suivante :

$$f(P) = c_1 \left( f_{H_2}(P) - \frac{(P - P_l) \eta_{bat}(P - P_l)}{\eta_{c,max} LHV} \right) + c_2 v_{MPAC}(P) + c_3 v_{BAT}(P) \quad (5.14)$$

où  $v_{MPAC}$  est la vitesse de dégradation du système multi-pile et  $v_{BAT}(P)$  est la vitesse de dégradation du pack batterie. Les paramètres  $c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$  représentent respectivement le coût de l'hydrogène, le coût du système multi-pile et le coût du pack batterie.  $f_{H_2}(P)$  est le débit massique d'hydrogène minimal que l'on peut obtenir lorsque le système multi-pile fournit la puissance  $P$ . La méthodologie permettant d'obtenir ce débit massique est présentée plus bas.

Le problème d'optimisation est alors défini comme :

**Problème d'optimisation : niveau de puissance**

$$P = \operatorname{argmin} f \quad (5.15)$$

sous contrainte

$$P_{\min}(SoC, m_{H_2}) \leq P \leq P_{\max}(SoC, m_{H_2}) \quad (5.16)$$

Ce problème d'optimisation est convexe et est résolu numériquement à l'aide de la méthode de descente du gradient.

**5.1.4.2/ PUISSANCE FOURNIE INDIVIDUELLEMENT PAR LES SYSTÈMES PAC**

Le problème d'optimisation à résoudre est l'optimisation du rendement via la distribution de puissance entre  $n$  piles :

**Problème d'optimisation : prise en compte de la consommation des auxiliaires**

$$\mathbf{P}^* = \arg \max_{\mathbf{P}} (\eta)$$

sous contraintes :

$$\sum_{i=1}^n (P_i - P_{aux,i}) = P_{tot}$$

$$\mathbf{P}_{\min}^{(c)} \leq \mathbf{P} \leq \mathbf{P}_{\max}^{(c)}$$

où  $P_{aux,i}$  est la puissance consommée par les auxiliaires du stack  $i$ .

Le modélisation considérée ici pour la pile à combustible est celle d'une source de tension fixe associée à une résistance en série. Les equations reflétant le modèle sont les suivantes :

$$V(I) = V_0 - RI \quad (5.17)$$

$$D(I) = \beta_0 + \beta_1 I \quad (5.18)$$

$$P_{aux}(P) = P_0 + kP \quad (5.19)$$

Ce modèle permet d'avoir une bonne approximation du comportement énergétique du système PAC dans sa plage de fonctionnement acceptable (Figure 5.4). Chaque pile du système possède ses propres paramètres. Ils seront présentés de la façon suivante :  $V_{0,i}$ ,  $R_i$ ,  $\beta_{0,i}$  et  $\beta_{1,i}$  pour la pile  $i$ .

Afin de garder la puissance comme variable du problème nous reformulerons ces équations en :

$$V(P) = V_0 - R \left( \frac{V_0^2}{4R} - \sqrt{\frac{V_0^2}{4R} - P} \right) \quad (5.20)$$

$$D(P) = \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{V_0^2}{4R} - \sqrt{\frac{V_0^2}{4R} - P} \right) \quad (5.21)$$

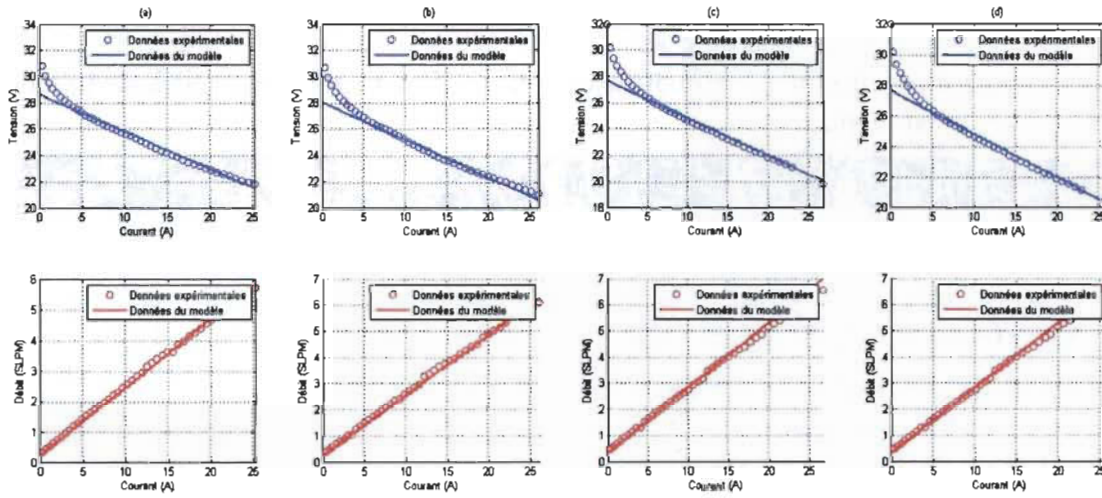


FIGURE 5.4 – Modèle paramétré aux pile du banc d'essai de l'IRH : (a) pile 1, (b) pile 2, (c) pile 3 et (d) pile 4

La maximisation du rendement équivaut à la minimisation du débit d'hydrogène consommé. Le problème d'optimisation est alors reformulé en :

Problème d'optimisation - version développée

$$[\mathbf{P}^*] = \arg \min_{\mathbf{P}} \left( \sum_{i=1}^n D_i(P_i) \right)$$

Où

$$D_i(P_i) = \left( \beta_{0,i} + \beta_{1,i} \frac{V_0^2}{4R} \right) - \beta_{1,i} \sqrt{\frac{V_0^2}{4R} - P_i}$$

sous contraintes :

$$\sum_{i=1}^n (P_i - P_{aux,i}(P_i)) = P_{tot}$$

$$\mathbf{P}_{min}^{(c)} \leq \mathbf{P} \leq \mathbf{P}_{max}^{(c)}$$

Où  $\mathbf{P}$  est la puissance attribuée à chaque pile du système,  $P_i$  est la puissance fournie par la pile  $i$ ,  $P_{tot}$  est la puissance totale à fournir par le système,  $\mathbf{P}_{\min}^{(c)}$  est la puissance minimale attribuable à chaque pile et  $\mathbf{P}_{\max}^{(c)}$  est la puissance maximale attribuable à chaque pile.

Pour adopter le formalisme des conditions de Karush-Kuhn-Tucker [Kuhn et al., 1951] (KKT) nous utiliserons les notations suivantes :

Soit  $h : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$  tel que :

$$h(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^n P_i - P_{tot} \quad (5.22)$$

Cette fonction  $h$  représente le respect des contraintes égalités du problème d'optimisation.

Soit  $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{2m}$  tel que :

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, g_i(\mathbf{P}) = P_i - P_{\max,i}^{(c)} \quad (5.23)$$

$$\forall i \in \llbracket n+1, 2n \rrbracket; g_{i+n}(\mathbf{P}) = P_{\min,i}^{(c)} - P_i \quad (5.24)$$

Cette fonction  $g$  représente le respect des contraintes inégalités du problème d'optimisation.

Le problème d'optimisation satisfait la condition de Slater. En effet le problème est convexe et il existe un point vérifiant les contraintes. Les conditions de KKT nous donne alors que :

#### Conditions de Karush-Kuhn-Tucker

$\exists \lambda \in \mathbb{R}, \exists \mu \in \mathbb{R}^{2m}$  tels que :

1.  $\mu \geq 0$
2.  $\nabla \left( \sum_{i=1}^m D_i(P_i^*) \right) + \lambda \nabla h(\mathbf{P}^*) + \mu \nabla g(\mathbf{P}^*) = 0$
3.  $\mu \cdot g(\mathbf{P}^*) = 0$
4.  $h(\mathbf{P}^*) = 0$
5.  $g(\mathbf{P}^*) \leq 0$

La résolution des équations fournies par les conditions de KKT permettent d'obtenir la distribution de puissance optimale. Des informations additionnelles sur la résolution de ces équations sont disponibles en annexe C.

## 5.2/ APPLICATION

Afin d'évaluer les performances de la stratégie de gestion proposée, une étude comparative a été effectuée. L'influence du cycle de conduite et de l'état initial du système sur ces performances a été placée au centre de cette étude. Afin de rester objectif vis-à-vis des cycles de conduites utilisés, il est nécessaire de considérer un nombre important de profils de conduite. Ainsi, pour chaque famille de cycles de conduite connus, des profils sont créés. Les cycles de conduite de type inconnu considérés pour cette étude sont des cycles normalisés autres que les profils ARTEMIS.

Pour pouvoir jauger les performances de la stratégie de gestion proposée, les résultats obtenus avec celles-ci seront comparés aux résultats obtenus avec deux autres stratégies de gestion développées pour des systèmes PAC multi-piles. La première se base sur une description du fonctionnement par une machine d'état. La deuxième se base sur une répartition fréquentiel et une méthode de distribution optimale.

### 5.2.1/ CRÉATION DE PROFILS DE CONDUITE

Dans le but de recréer artificiellement les familles de cycles de conduite, une méthodologie de création de cycle de conduite a été développée. La création de profil de conduite n'étant pas une thématique fortement traitée, la méthodologie présentée ici s'appuie ici sur les travaux effectués pour créer les cycles de conduite ARTEMIS.

Le procédé se divise en deux étapes. La première consiste en l'analyse des types de conduite que l'on rencontre au sein du cycle ainsi que les phases de transition entre ces derniers. Lorsque ces types de conduite et phases de transitions ont été identifiés il est nécessaire de caractériser le comportement du véhicule durant ceux-ci.

#### 5.2.1.1/ ANALYSE DES TYPES DE CONDUITE

Dans le but de concevoir des cycles de conduites similaires aux cycles de références, il est nécessaire de caractériser ces trois profils de références. Le profil sera partitionné en fonction du type de conduite observé. Quatre types de conduite (arrêt, urbain, rural et autoroutier) seront considérés ainsi que deux types de transition entre ces quatre type de conduite (accélération, décélération).

La délimitation entre ces différents types de conduite a été déterminée arbitrairement. Le partitionnement adopté pour les trois cycles de références est présenté en figure 5.5.

La distribution temporelle des partitions de chacun des cycle est présentée dans le tableau 5.2.

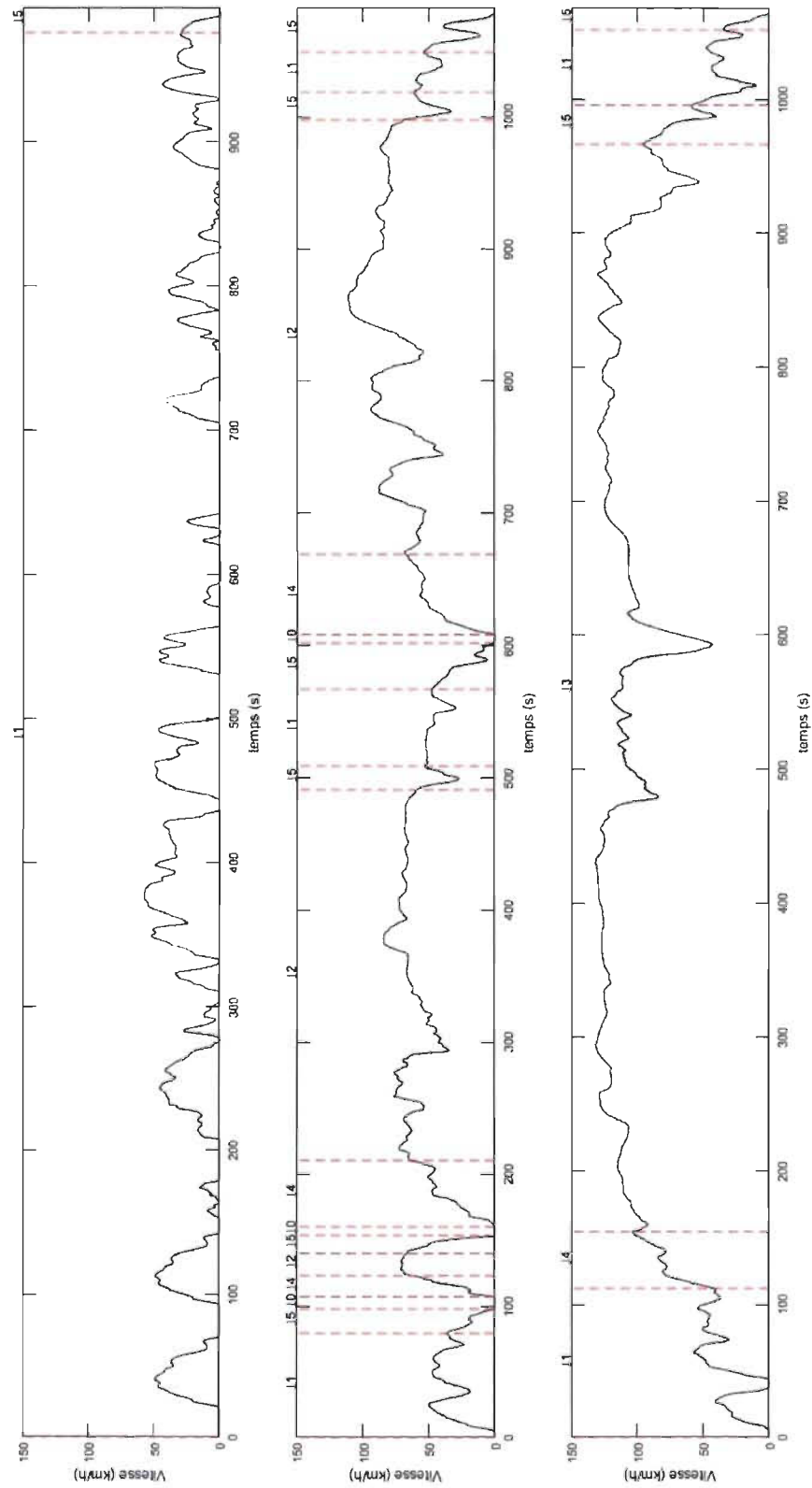


FIGURE 5.5 – Partitionnement des cycles de références en fonction des types de conduite ( 0 : arrêt, 1 : urbain, 2 : rural, 3 : autoroutier, 4 : accélération, 5 : décélération).



TABLE 5.2 – Distribution temporelle des types de conduite observés

	<b>urbain</b>	<b>rural</b>	<b>autoroutier</b>
Arrêt	0	0.02	0
Urbain	0.983	0.156	0.157
Rural	0	0.579	0
Autoroutier	0	0	0.7612
Accélération	0	0.117	0.039
Décélération	0.017	0.127	0.042

### 5.2.1.2/ COMPORTEMENT DU VÉHICULE

L'émulation du comportement du véhicule pour chaque type de conduite nécessite une modélisation de celui-ci pour chaque type de conduite observé. La modélisation par les chaines de Markov offre une caractérisation stochastique de l'évolution de la vitesse [Gong et al., 2011]. La vitesse à un instant  $t + \tau$  suis une distribution de probabilité dépendante de la vitesse à l'instant  $t$ .  $\tau$  étant le pas de discrétisation temporel. La détermination de cette distribution de probabilité requiert des données de vitesse. Ces données sont obtenues à partir du partitionnement des cycles de références.

le  $\tau = 2s$  sont considérés pour l'obtention des chaines de Markov. Elles sont présentées en figure 5.6. Ces valeurs ont été déterminées arbitrairement afin d'assurer un bon fonctionnement de l'algorithme de création de profil.

### 5.2.1.3/ CRÉATION DE PROFILS DE CONDUITE

Les profils de conduite créés doivent respecter le partitionnement déterminé plus haut. Ainsi, lors de la création d'un profil, les phases de conduite sont observées dans le même ordre que défini précédemment. La vitesse au cours de ces phases est alors déterminée par tirage aléatoire en se basant sur les probabilités données par la chaine de Markov associée. La figure 5.7 présente un cycle de conduite créé pour chaque profil de référence et le compare à ce dernier.

## 5.2.2/ RÉSULTATS DE SIMULATION ET EXPLOITATION

Dans cette section, il est question d'évaluer le comportement de la stratégie proposée à travers la simulation du comportement du véhicule sur les différents parcours créés à cet effet. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à ceux obtenus pour deux autres stratégies de gestion énergétique adaptées aux systèmes PAC multi-pile.

### 5.2.2.1/ DÉFINITION DE L'ÉTUDE

Afin d'évaluer les performances de la stratégie de gestion énergétique proposée dans ce chapitre, elle sera évaluée en simulation sur trois familles de cycles créées à partir des cycles de référence ARTEMIS et une famille de cycles normalisés. Des informations sur

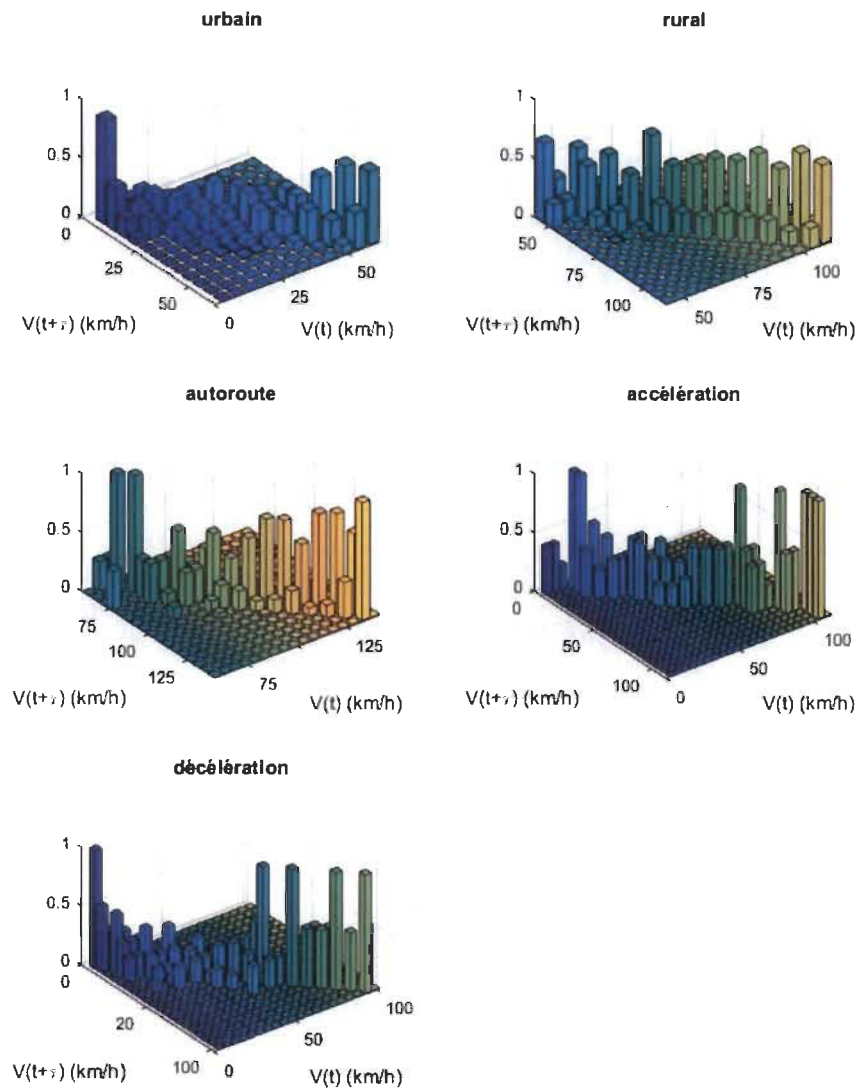


FIGURE 5.6 – Chaines de Markov pour les différents types de conduite

ces cycles sont présentées dans le tableau 5.3 et plus de détails sont disponibles en annexe D.

La dépendance des performances de la gestion énergétique vis-à-vis de l'état de charge batterie initial est étudié. La stratégie est évaluée pour des valeurs d'état de charge initial comprises entre 40% et 60%. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus pour deux autres stratégies de gestion énergétique conçues pour exploiter les avantages des systèmes PAC multi-pile. Celles-ci sont présentées dans le paragraphe suivant.

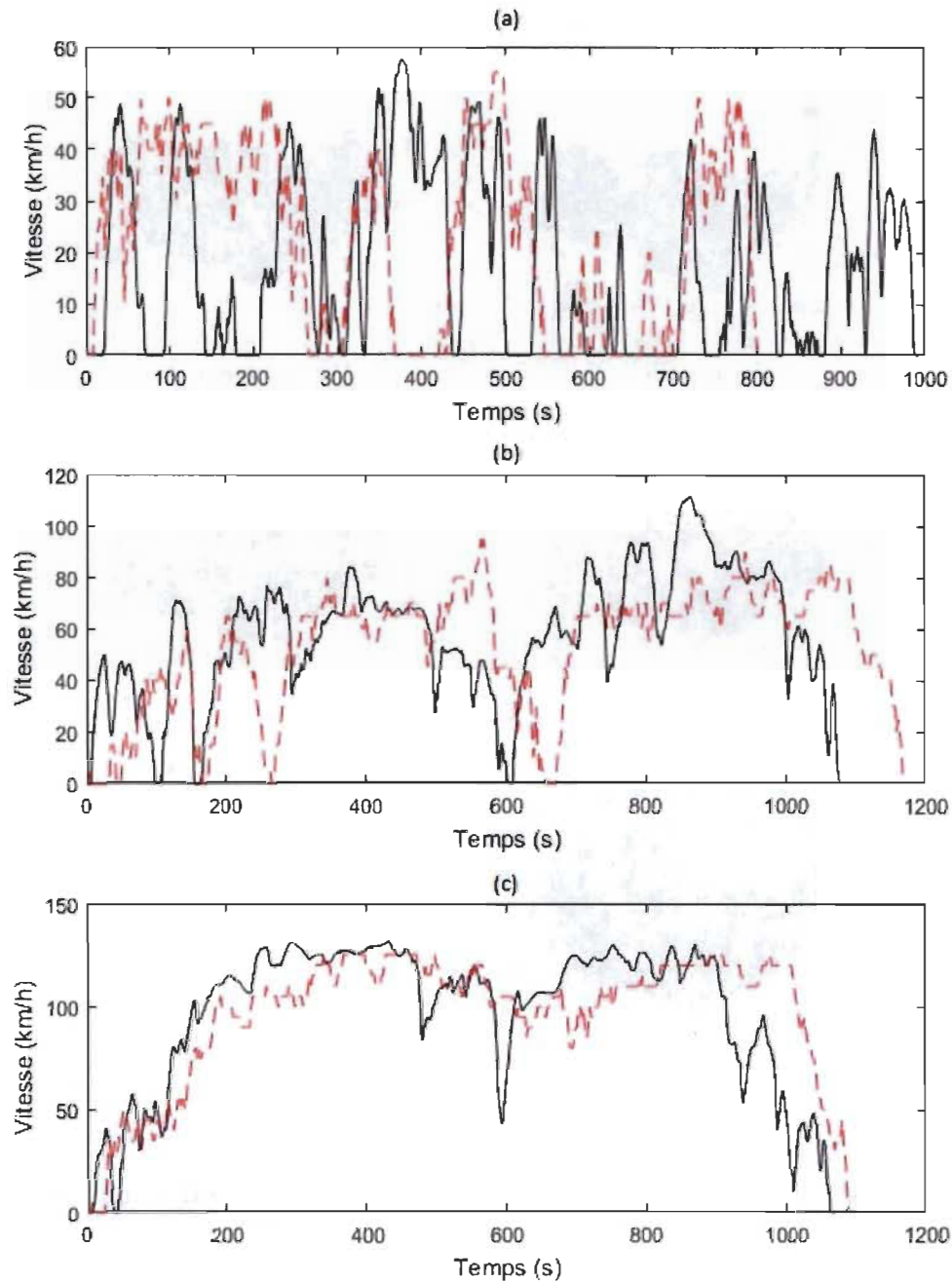


FIGURE 5.7 – Cycles créés (trait pointillé) et cycles de références (trait plein) - a : cycle urbain, b : cycle rural, c : cycle autoroutier

#### 5.2.2.2) STRATÉGIES DE GESTION ÉNERGÉTIQUE

La première stratégie de gestion à laquelle sera comparée la gestion proposée dans ce manuscrit se base sur un partage fréquentiel du besoin en puissance entre le système PAC

TABLE 5.3 – Détails des cycles de conduite

	durée (s)	distance (m)	énergie (kWh)	puissance moyenne (kW)
urbain 1	799	5177	1.19	5.34
urbain 2	739	4941	1.15	5.59
urbain 3	1057	4930	1.43	4.87
urbain 4	553	4913	0.88	5.69
urbain 5	965	4922	1.53	5.70
urbain 6	801	5091	1.23	5.50
urbain 7	731	4838	1.12	5.50
urbain 8	769	4899	1.13	5.30
urbain 9	1081	4902	1.53	5.09
urbain 10	743	4899	1.04	5.04
rural 1	1167	17066	2.52	7.77
rural 2	1189	17152	2.63	7.96
rural 3	1181	17405	2.66	8.10
rural 4	1397	17141	2.81	7.24
rural 5	1343	17591	2.77	7.42
rural 6	1089	17130	2.48	8.18
rural 7	1321	17086	2.61	7.12
rural 8	1671	17355	3.19	6.87
rural 9	1179	17552	2.90	8.84
rural 10	1351	17188	2.82	7.52
autoroute 1	1087	29002	5.48	18.13
autoroute 2	1135	28816	5.53	17.52
autoroute 3	1179	28872	5.46	16.67
autoroute 4	1181	29824	5.77	17.56
autoroute 5	1223	28958	5.76	16.93
autoroute 6	1499	28824	5.89	14.14
autoroute 7	1181	28783	6.09	18.56
autoroute 8	1207	28836	5.83	17.39
autoroute 9	1159	29449	5.73	17.79
autoroute 10	1177	28705	6.04	18.47
normalisé 1	1434	9816	4.15	10.42
normalisé 2	764	10256	3.52	16.58
normalisé 3	1664	7438	2.57	5.56
normalisé 4	1639	15508	5.60	12.28
normalisé 5	599	8007	3.92	23.52
normalisé 6	1059	5552	2.06	7.01
normalisé 7	1368	7450	2.75	7.24
normalisé 8	599	3579	1.33	7.97
normalisé 9	1399	20040	8.90	22.89
normalisé 10	597	1179	0.78	4.72

multi-pile et le pack batterie. La puissance délivrée par le système PAC multi-pile est alors déterminée grâce à la fonction de transfert suivante :

$$\frac{P_{PAC}}{P_{charge}}(p) = \frac{1}{1 + \frac{p}{f}} \quad (5.25)$$

où  $P_{PAC}$  est la puissance fournie par le système PAC multi-pile,  $P_{charge}$  est la puissance demandée par la charge et  $f$  est la fréquence de coupure du filtre.

Le nombre de systèmes PAC démarrés correspond alors au nombre minimal de système permettant de satisfaire la demande en puissance. La puissance attribuée au système PAC multi-pile est alors distribuée aux systèmes PAC démarrés de façon optimale vis-à-vis de la consommation instantanée d'hydrogène.

La deuxième stratégie a été présentée dans l'article [Marx et al., 2017]. Elle se base sur une machine d'état comprenant cinq état correspondant au nombre de PAC en fonctionnement (de 0 à 4). Les transitions entre ces états sont définies par rapport à des seuils d'état de charge.

La puissance fournie par chaque PAC est dépendante de l'état de charge. Tant que ce dernier demeure au dessus d'une valeur constante définie, les PAC fonctionnent à leur point de rendement maximum. En dessous de ce seuil, les PAC fonctionnent à pleine puissance.

La figure 5.8 illustre plus en détail le fonctionnement de cette stratégie de gestion énergétique.

Ici, le dimensionnement permet de ne pas se soucier des conditions et contraintes concernant la puissance de la batterie.

### 5.2.2.3/ PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Le nombre de simulation étant conséquent il n'est pas possible de présenter tous les profils de puissance obtenus au cours de ces simulations. Ici, nous présenterons les profils obtenus pour les cycles urbain 1, rural 1, autoroutier 1 et normalisé 1.

On constate que les profils sont fondamentalement différents. Cela a un impact considérable sur leurs performances.

### 5.2.2.4/ ANALYSE DES RÉSULTATS

Afin d'évaluer les performances des stratégies de gestion étudiées, nous considérerons premièrement le coût d'exploitation comme défini en équation 5.13. L'évolution du coût d'exploitation en fonction du cycle de conduite sur lequel il a été évalué est présenté en figure 5.10.

On constate que pour les cycles urbains, les coûts engendrés par la stratégie basée sur la

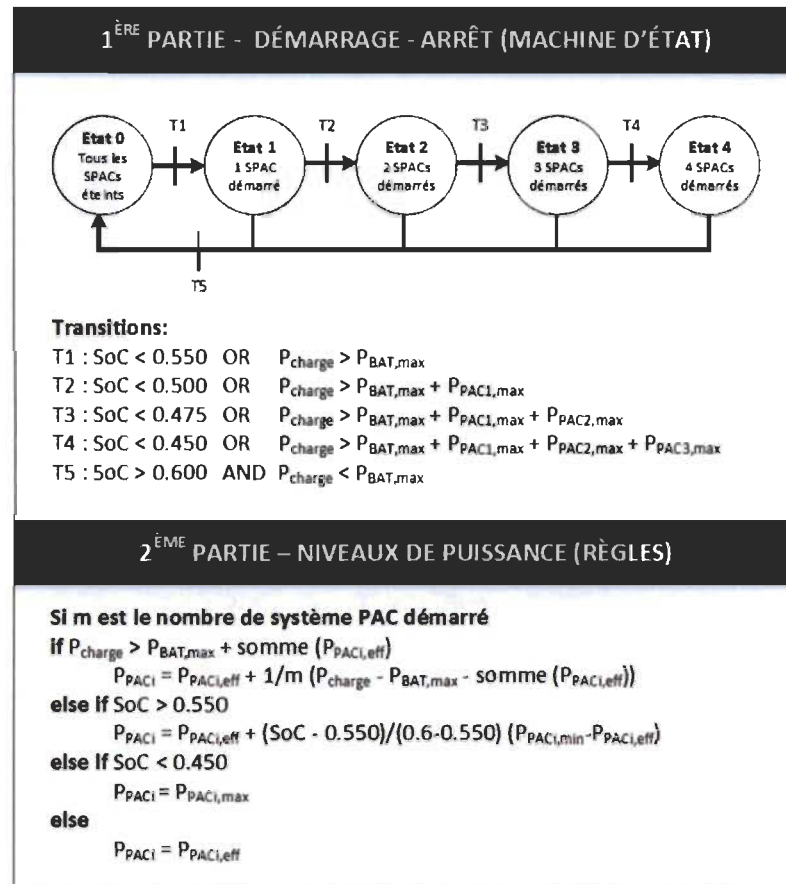


FIGURE 5.8 – Stratégie de gestion énergétique basée sur une machine d'état. (adapté de [Marx et al., 2017])

théorie de décision bayésienne et la machine d'état sont similaires et inférieures à ceux obtenus par la troisième stratégie. Pour les cycles ruraux et autoroutier, un net avantage est obtenu par la stratégie basée sur la théorie de décision bayésienne. Finalement, pour les cycles normalisés, les résultats affichés par les trois stratégies sont similaires.

Il est possible d'expliquer l'écart entre les performances des différentes stratégies vis-à-vis du coût d'exploitation en observant leur impact sur la dégradation des organes énergétiques (figure 5.11 et 5.12).

Ainsi on remarque que pour les cycles ruraux, la dégradation du système PAC multiple est 100% à 200% plus importante pour les stratégies basées sur la distribution fréquentielle et la machine d'état. Cela s'explique par le fait que cette dégradation est due principalement au démarrage des PAC. La stratégie basée sur la décision bayésienne est alors avantageée car elle se base sur la connaissance d'un profil de référence pour minimiser ce paramètre. Toutefois, même lorsque le trajet est inconnu cette stratégie permet d'obtenir les meilleurs résultats parmi les trois stratégies étudiées.

Pour ce qui est de la dégradation subie par le pack batterie, on remarque que la stratégie basée sur les règles est la plus avantageée. Les différences sont le plus remarquable



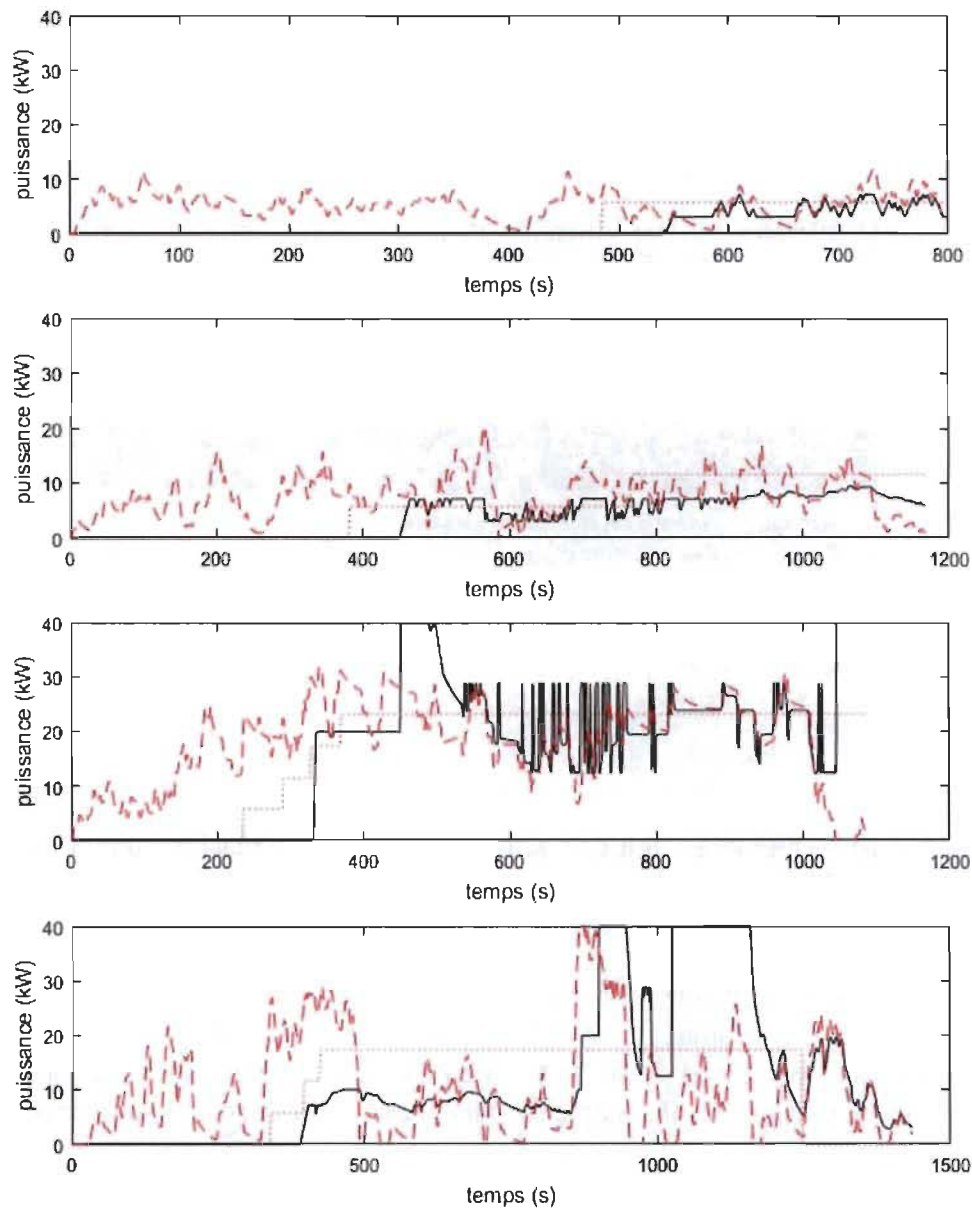


FIGURE 5.9 – Profils de puissance pour les cycles urbain, rural, autoroutier, standardisé numéro 1. noir : décision bayésienne, rouge long : fonction de transfert, rouge court : basée sur les règles

lorsque la demande en puissance est plus importante (cycles autoroutiers et normalisés sur autoroute). La stratégie basée sur la décision bayésienne est toutefois avantageée par rapport à la stratégie basée sur la machine d'état car elle intègre la dégradation de la batterie comme facteur à minimiser alors que seule la consommation d'hydrogène est considérée pour la stratégie basée sur la machine d'état.



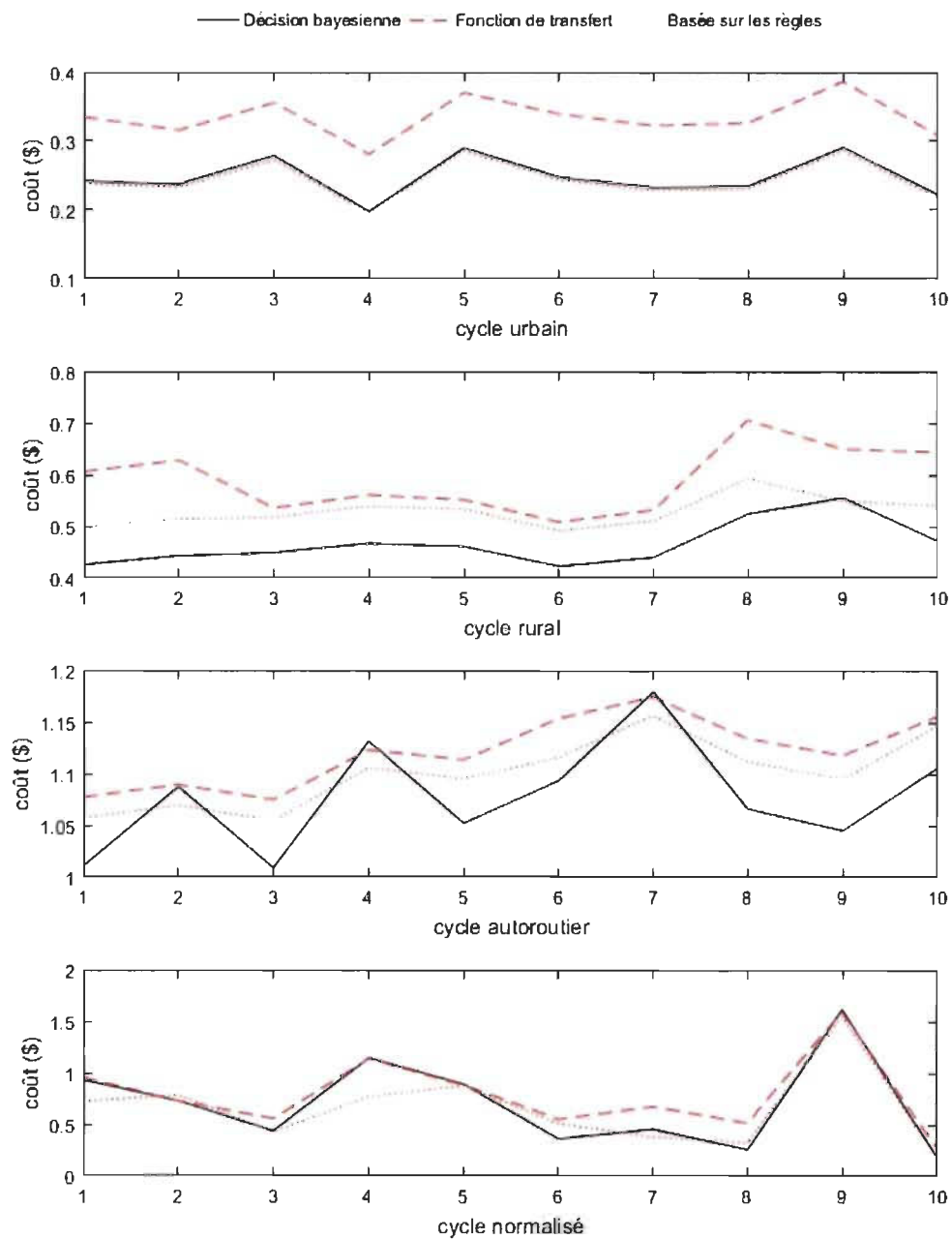


FIGURE 5.10 – Coût d'exploitation en fonction du cycle de conduite

Néanmoins, il est nécessaire de noter que l'état de charge final n'est pas égal à celui de départ sauf pour la stratégie basée sur les règles qui par définition fournit la puissance moyenne sur le cycle. Cela influe donc sur la façon dont il faudrait interpréter le coût, car il faudrait alors prendre en compte le coût du prochain cycle qui ne démarrera donc pas au même état de charge initial.

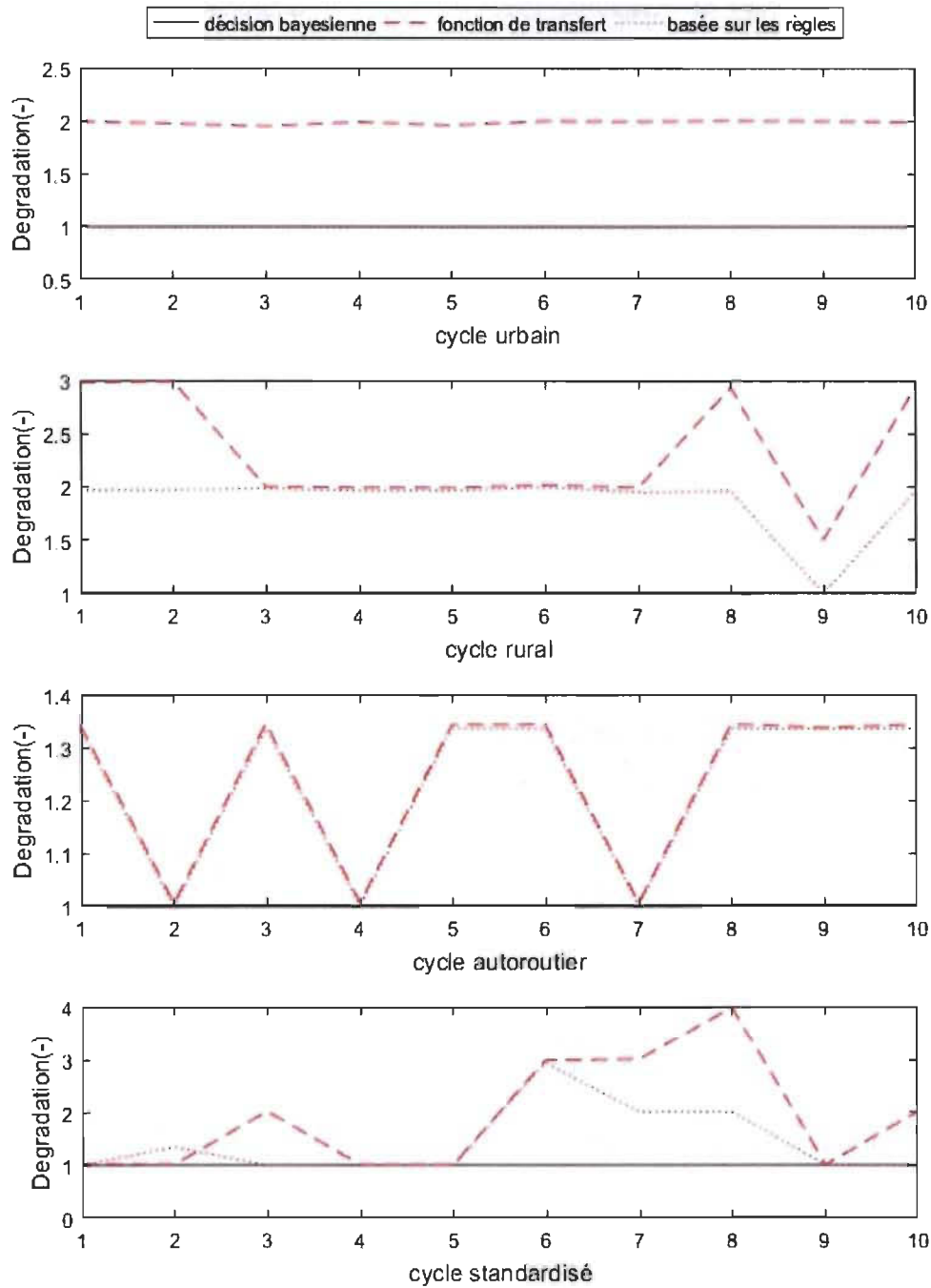


FIGURE 5.11 – Ratio de dégradation (rapporté à la stratégie bayésienne) du système PAC multi-pile en fonction du cycle de conduite

Finalement, la demande en calcul est bien plus importante pour la stratégie basée sur la théorie de décision bayésienne. Ainsi, en considérant une implémentation sans

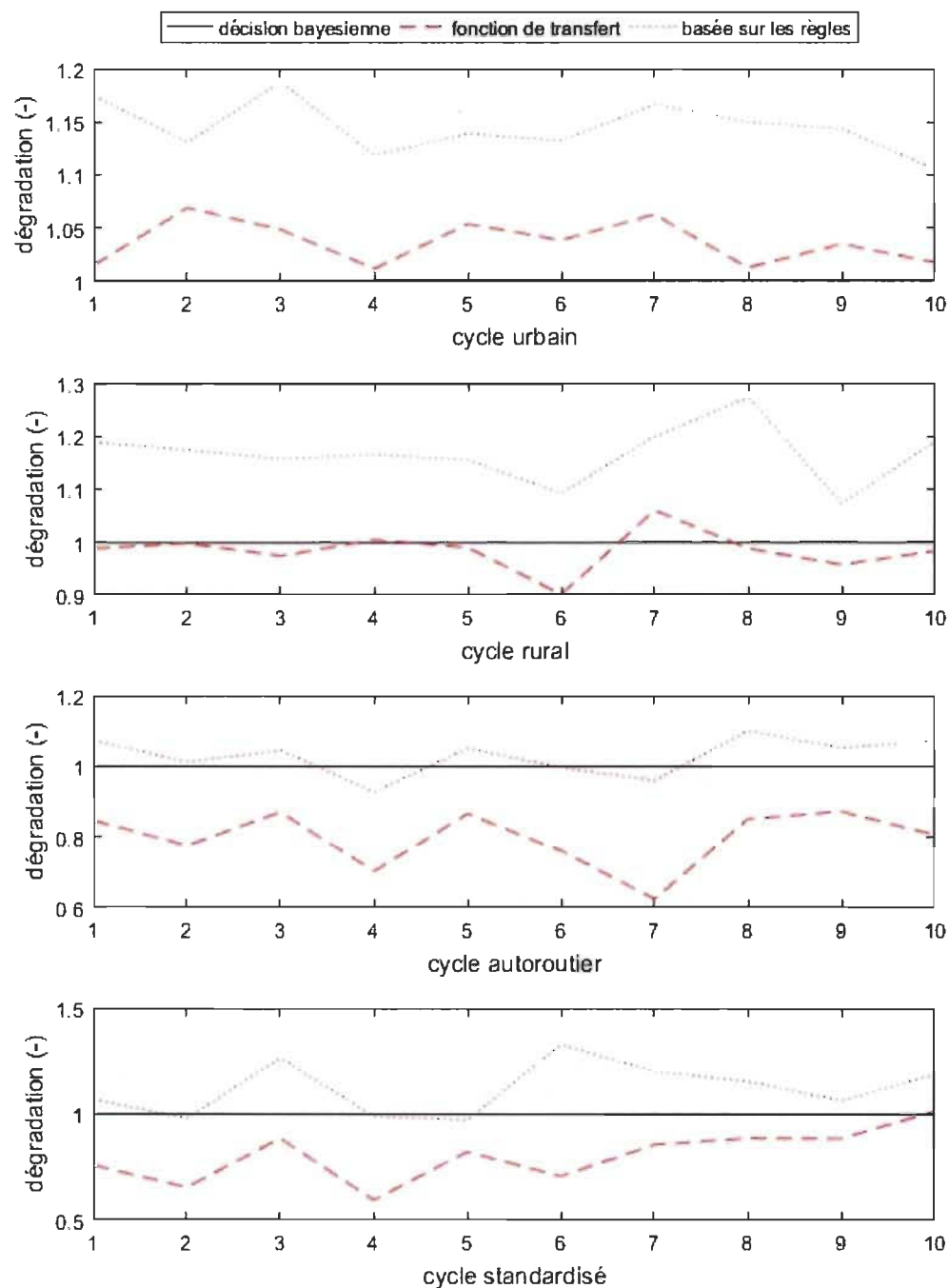


FIGURE 5.12 – Ratio de dégradation (rapporté à la stratégie bayésienne) du pack batterie en fonction du cycle de conduite

parallélisation ni optimisation du code, il n'est possible que d'obtenir une évaluation de la théorie de décision bayésienne toutes les 10 seconde en moyenne à l'aide d'une machine standard. Les autres stratégies ne sont pas gourmandes en temps de calcul et

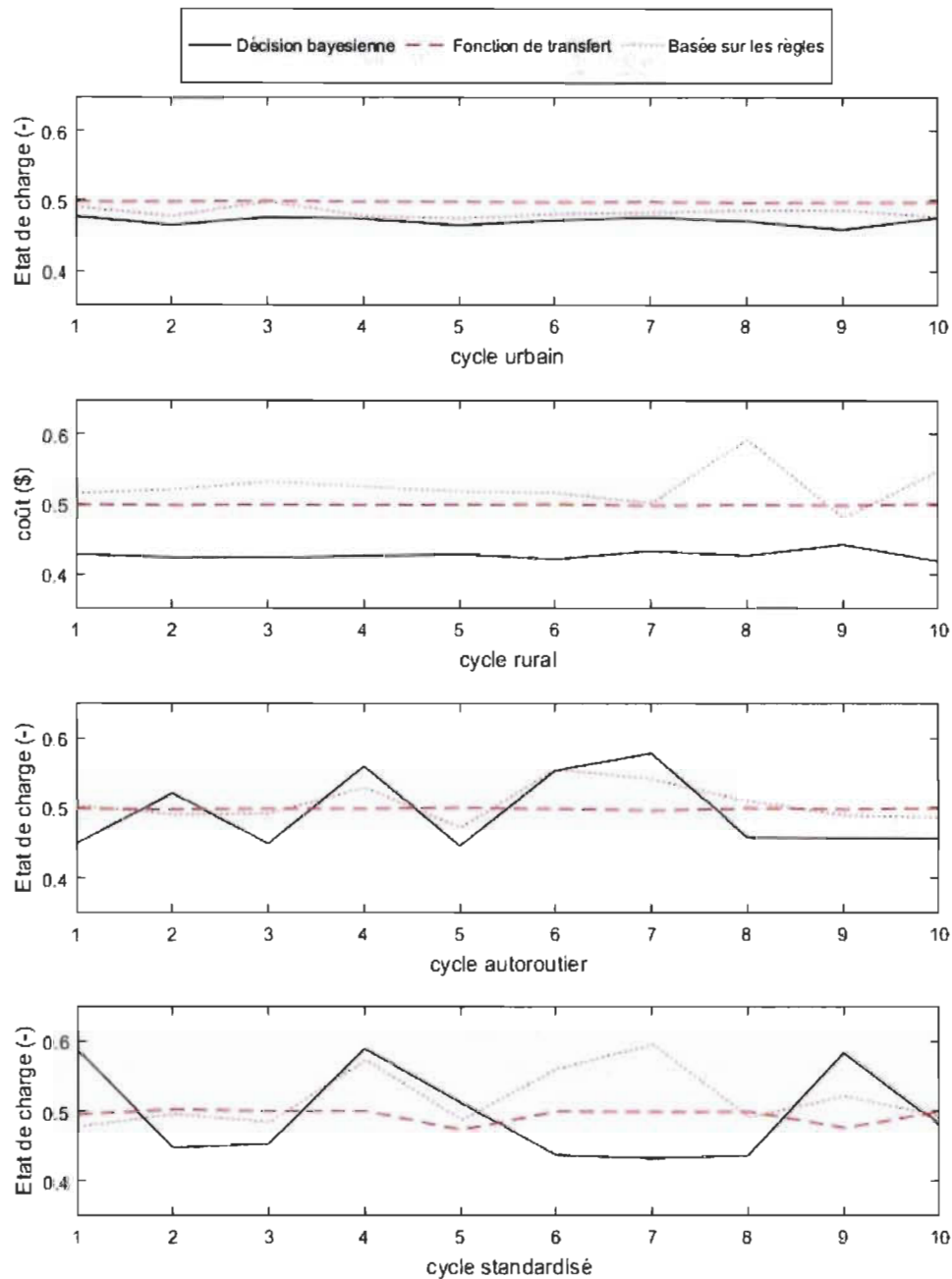


FIGURE 5.13 – Etat de charge final en fonction du cycle de conduite

offrent un temps de calcul de l'ordre de la dizaine de millisecondes. Toutefois, même avec une fréquence de mise à jour faible du nombre de systèmes PAC démarrés, les résultats obtenus montre un avantage en terme de coût d'exploitation et de durée de vie. La gestion du niveau de puissance n'impose pas une charge de calcul importante et nécessite une centaine de milliseconde pour être calculée. Les avantages et inconvénients des stratégies présentées dans ce chapitre sont résumés dans le tableau 5.4.

TABLE 5.4 – Détails des cycles de conduite

	charge de calcul	coût d'exploitation	Dégradation des systèmes PAC	Dégradation de la batterie
Décision bayésienne	-	++	+	+
Basé sur les règles	+	+	++	-
Fonction de transfert	+	-	-	++

### 5.3/ CONCLUSION

Dans ce chapitre, une stratégie de gestion énergétique pour les systèmes PAC multi-pile hybridés à une batterie est proposée. Cette stratégie est constituée de plusieurs modules contrôlant le démarrage de stack additionnels et la gestion du niveau de puissance fourni par le système. Le premier module gérant le démarrage de stacks additionnels est composée de sous-modules permettant d'identifier le trajet en cours et assurant une prise de décision la moins couteuse pour l'utilisateur en se basant sur la théorie de décision bayésienne. Le deuxième module détermine le niveau de puissance fourni par le système multi-pile et sa distribution entre les éléments le composant. Ce module se base sur des méthodes optimisation permettant de minimiser la dérivée du cout d'exploitation.

Les performances de cette stratégie ont été évaluées sur des cycles de conduite créés grâce à une méthode basée sur les chaines de Markov. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus pour deux autres stratégies de gestion énergétique conçues pour les systèmes multi-pile. Les résultats décrivent une diminution du coût d'exploitation en faveur de la stratégie proposée dans ce manuscrit. En effet, cette stratégie permet de réduire fortement la dégradation du système en minimisant le nombre de démarrages et le temps d'utilisation des PAC. Il faut toutefois noter que cette stratégie est plus gourmande en temps de calcul.

De plus, cette stratégie de gestion énergétique se base principalement sur les résultats d'optimisation obtenus au chapitre 4 qui eux sont fortement dépendant des courbes de rendement et hypothèses de vieillissement considérées. D'autres hypothèses vis-à-vis de la dégradation ou de la courbe de rendement du système PAC pourraient donc mener à une stratégie ne privilégiant pas le démarrage du nombre minimal de PAC comme celle présentée ici. Les courbes de rendement évoluent également au cours de la vie du système. En incorporant toutes ces incertitudes dans la caractérisation de la problématique de la gestion énergétique du système hybride, il serait alors sûrement plus judicieux d'utiliser une méthode pouvant s'adapter à tous ces paramètres.



# III

## CONCLUSION





## CONCLUSION

### 6.1/ TRAVAUX EFFECTUÉS

Le premier chapitre de ce manuscrit présente l'état de l'art de la recherche sur les systèmes PAC multi-piles. Grâce à celui-ci il a été possible de mettre en évidence les thématiques les plus prometteuses. Ainsi, le fonctionnement en mode dégradé, l'électronique de puissance et les configurations d'utilisation des systèmes PAC multi-piles sont les sujets les plus étudiés. Toutefois, leur gestion énergétique et leur dimensionnement font partie des thématiques les moins explorées alors qu'elles ont une influence considérable sur les performances du système. C'est pourquoi cette thématique est au coeur des travaux présentés dans ce manuscrit. De plus, l'expertise des équipes de recherche de l'IRH et du FCLAB sur ces thématiques est un avantage.

Afin de limiter les coûts, la plupart des travaux de cette thèse ont été effectués en simulation. Il a donc été nécessaire de modéliser le comportement énergétique et le vieillissement du système de fourniture énergétique. Dans le deuxième chapitre, ce modèle est décrit. Le formalisme REM a été adopté pour permettre de rendre compte plus facilement des échanges énergétiques entre les différents éléments du système. Le système PAC et la batterie sont modélisés. C'est un modèle de système PAC atmosphérique optant pour un fonctionnement à anode fermée. Le paramétrage du modèle a été effectué à partir de données obtenues sur le banc de test de l'IRH. Les résultats de simulation du modèle montrent que le comportement approche bien celui du système réel obtenu expérimentalement en utilisant un profil de puissance automobile. La modélisation du vieillissement des PAC et des batteries est une thématique de recherche active. Ici, nous avons opté pour un modèle empirique issu de la littérature pour la batterie et un modèle adapté de la littérature pour la PAC.

Le troisième chapitre met en avant l'influence de la gestion énergétique et du dimensionnement sur un système PAC multi-pile ainsi qu'une comparaison des performances des systèmes PAC multi-pile et monopile dans le cadre d'une application automobile. Basé sur la résolution d'un problème d'optimisation, les résultats présentés montrent que, dans le cadre de l'étude présentée, les systèmes multi-piles affichent de meilleures performances que les systèmes monopiles. La dégradation des systèmes multi-piles est plus lente et leur consommation plus faible. De plus, plus le taux d'hybridation diminue

plus l'écart entre les performances des systèmes multi-pile et monopile augmente. Le comportement décrit par la stratégies de gestion optimale tend à limiter le nombre de systèmes mis en route au minimum nécessaire pour effectuer le cycle. Un fonctionnement le plus proche du rendement maximum respectant les contraintes de puissance est alors privilégié.

Afin d'évaluer les performances en conditions réelles d'un système PAC multi-pile, une stratégie de gestion énergétique en ligne a été mise au point. Cette stratégie est composée de trois modules. Le premier module estime le degré de similarité entre le profil parcouru et plusieurs profils de référence caractérisant le comportement du conducteur. Ensuite, à partir de ce résultat, le deuxième module permet de déterminer si il est nécessaire de démarrer un système PAC additionnel en utilisant une méthode basée sur la théorie de décision bayésienne. Le dernier module définit le niveau de puissance fourni par les sources du système ayant été précédemment démarrées à l'aide d'une méthode minimisant la dérivée du coût d'exploitation. Cette stratégie de gestion énergétique a été comparée à deux stratégies de gestion énergétique en ligne conçues pour les systèmes PAC multi-piles. Cette stratégie permet alors d'obtenir de meilleures performances en termes de dégradation, coût d'exploitation mais impose une charge de calcul plus élevée au calculateur.

## 6.2/ PERSPECTIVES

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont permis d'identifier l'impact de la gestion énergétique et du dimensionnement sur les performances d'un système PAC multi-piles. Les résultats présentés permettent de confirmer certains avantages offerts par les systèmes multi-piles vis-à-vis des systèmes mono-piles. Toutefois, plusieurs aspects de ces travaux pourraient être revu afin d'approfondir l'étude de l'influence de la gestion énergétique.

A ce jour, peu de travaux ont été menés par rapport à la gestion de la température des systèmes multi-pile. L'étude de l'influence de l'architecture et de la stratégie de gestion de la température sur le coût d'exploitation permettrait d'inclure ce degré de liberté supplémentaire à la stratégie de gestion proposée. De plus, cette thématique semble très pertinente lorsqu'on considère un fonctionnement en condition hivernale. Ainsi le maintien en température ou la montée en température d'un stack en prévision de son démarrage peut être affecté par l'utilisation d'une architecture multi-pile.

Dans l'étude décrite dans le troisième chapitre, le nombre de piles à combustible composant le système est fixé à 4 et le dimensionnement des sources en puissance considère ces valeurs parmi 5 couples de valeurs possibles. Afin d'explorer plus en détail l'influence du dimensionnement, il serait intéressant d'étudier plus de cas, voir de rendre ces valeurs variables. Le modèle du système PAC utilisé pour l'optimisation est l'équivalent statique du modèle présentés dans le deuxième chapitre et ne prend pas en compte les dynamiques de température, de tension. En particulier la température du système PAC

est considérée fixe. Afin d'introduire ces changements il est nécessaire de modifier la méthode d'optimisation car les contraintes de temps de calcul et d'espace mémoire restent un facteur limitant en utilisant la programmation dynamique. L'utilisation de méthodes d'optimisation hybride pourrait alors permettre d'être moins limité vis-à-vis de la complexité du modèle et du périmètre de l'action optimisée. Il serait alors possible d'influer sur la température et la stœchiométrie en plus du profil de puissance.

D'autres méthodes d'optimisation telle que la programmation linéaire peuvent également être utilisées. Toutefois, le problème d'optimisation n'étant pas linéaire, sa linéarisation serait alors nécessaire et la solution obtenue pourrait différer de l'optimum du problème d'optimisation de départ. Il est alors nécessaire d'évaluer le compromis entre temps de résolution et précision de la solution.

L'utilisation de méthodes plus rapides permettrait alors de considérer le problème de co-conception de la gestion énergétique et du dimensionnement mais aussi d'inclure les configurations fluidiques, électrique et thermiques comme variable. Ces configurations n'étant pas contraintes, il serait possible d'envisager des configurations hybrides de type série-parallèle avec des branches parallèles de puissance différentes pour s'adapter au mieux au besoin du cas d'application. Toutefois, il faudrait également s'assurer de la généralité des résultats obtenus car ces résultats d'optimisation pourraient différer grandement en fonction de l'application considérée.

Il est également possible d'étendre la conception de la gestion énergétique aux aspects de clustering des trajets et de création de trajet représentatif. Ce processus aurait également une influence sur les performances de la gestion énergétique. Il serait alors intéressant d'étudier cette influence.

Finalement, les travaux menés au cours de cette thèse ont principalement été menés en simulation. Une campagne d'essais permettrait de valider les résultats en conditions réelles et de promouvoir plus facilement les technologies multi-piles auprès de l'industrie.



# BIBLIOGRAPHIE

- [DOE, 2012] (2012). **Multi-year research, development and demonstration plan**. Rapport technique, Fuel Cell Technologies Office US D.O.E.
- [Andre, 2004] Andre, M. (2004). **The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions**. *The Science of the total environment*, 334-335 :73–84.
- [Assabumrungrat et al., 2009] Assabumrungrat, S., Ruangrassamee, N., Vivanpatarakij, S., Laosiripojana, N., et Arpornwichanop, A. (2009). **Influence of stack arrangement on performance of multiple-stack solid oxide fuel cells with non-uniform potential operation**. *Journal of Power Sources*, 187(1) :1–7.
- [Babazadeh et al., 2014] Babazadeh, H., Asghari, B., et Sharma, R. (2014). **A new control scheme in a multi-battery management system for expanding microgrids**. *2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2014*, 95014 :1–5.
- [Barbir, 2013] Barbir, F. (2013). **PEM Fuel Cells Theory and Practice**. Academic Press, Burlington, first édition.
- [Basualdo et al., 2012] Basualdo, M. S., Feroldi, D., et Outbib, R., éditeurs (2012). **PEM Fuel Cells with Bio-Ethanol Processor Systems**. Springer London.
- [Bellman, 1954] Bellman, R. (1954). **The theory of dynamic programming**. Rapport technique, DTIC Document.
- [Berger, 2013] Berger, J. O. (2013). **Statistical decision theory and Bayesian analysis**. Springer Science & Business Media.
- [Bernard et al., 2009] Bernard, J., Delprat, S., Buchi, F. N., et Guerra, T. M. (2009). **Fuel-cell hybrid powertrain : Toward minimization of hydrogen consumption**. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(7) :3168–3176.
- [Bishop, 2006] Bishop, C. M. (2006). **Pattern recognition**. *Machine Learning*, 128 :1–58.
- [Bordignon, 1996] Bordignon, K. A. (1996). **Constrained Control Allocation for Systems with Redundant Control Effectors**. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [Boulon, 2009] Boulon, L. (2009). **Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d'énergie**. PhD thesis.
- [Brahma et al., 2000] Brahma, A., Guezennec, Y., et Rizzoni, G. (2000). **Optimal energy management in series hybrid electric vehicles**. Dans *Proceedings of the 2000 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No.00CH36334)*, volume 1, pages 60–64 vol.1.
- [Cavaud et al., 2016] Cavaud, D., Coleou, Z., Coltier, Y., xavier Dussud, F., Ecoiffier, M., Gong, Z., Misak, E., Mombel, D., et Reynaud, D. (2016). **Chiffres clés de l'énergie - édition 2016**. Rapport technique, Service de l'observation et des statistiques.



- [Chen et al., 2015] Chen, H., Pei, P., et Song, M. (2015). **Lifetime prediction and the economic lifetime of proton exchange membrane fuel cells**. *Applied Energy*, 142 :154 – 163.
- [Davis, 1991] Davis, L. (1991). **Handbook of genetic algorithms**.
- [De Bernardinis et al., 2008a] De Bernardinis, A., et Coquery, G. (2008a). **First approach for a fault tolerant power converter interface for multi-stack PEM fuel cell generator in transportation systems**. Dans *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pages 2192–2199. IEEE.
- [De Bernardinis et al., 2012] De Bernardinis, A., Frappe, E., Bethoux, O., Marchand, C., et Coquery, G. (2012). **Electrical architecture for high power segmented PEM fuel cell in vehicle application**. Dans *2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology*, pages 15–22. IEEE.
- [De Bernardinis et al., 2008b] De Bernardinis, A., Péra, M.-C., Garnier, J., Hissel, D., Coquery, G., et Kauffmann, J.-M. (2008b). **Fuel cells multi-stack power architectures and experimental validation of 1kW parallel twin stack PEFC generator based on high frequency magnetic coupling dedicated to on board power unit**. *Energy Conversion and Management*, 49(8) :2367–2383.
- [Finke et al., 2014] Finke, M., et Legrand, V. (2014). **La transition énergétique du secteur des transports**. Rapport technique.
- [Frappé, 2012] Frappé, E. (2012). **Architecture de convertisseur statique tolérante aux pannes pour générateur pile à combustible modulaire de puissance-traction 30kW**. PhD thesis, UNIVERSITE PARIS-SUD.
- [Frappe et al., 2010] Frappe, E., De Bernardinis, A., Coquery, G., Bethoux, O., et Marchand, C. (2010). **Corrective action with power converter for faulty multiple fuel cells generator used in transportation**. Dans *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pages 1–6. Laboratory of New Technologies (LTN) / SPEE-Labs, The French national institute for transport and safety research (INRETS), Versailles, France, IEEE.
- [Fuller et al., 1993] Fuller, T. F., et Newman, J. (1993). **Water and thermal management in solid-polymer-electrolyte fuel cells**. *Journal of the Electrochemical Society*, 140(5) :1218–1225.
- [Garnier et al., 2005] Garnier, J., De Bernardinis, A., Lallemand, R., Pera, M., Coquery, G., et Kauffmann, J. (2005). **High frequency power converter for PEFC generator architecture based on a multi stacks association for transportation applications**. Dans *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, pages 10 pp.–P.10. IEEE.
- [Garnier et al., 2006] Garnier, J., De Bernardinis, A., Péra, M.-C., Hissel, D., Candusso, D., Kauffmann, J.-M., et Coquery, G. (2006). **Study of a PEFC power generator modular architecture based on a multi-stack association**. *Journal of Power Sources*, 156(1) :108–113.
- [GIEC, 2015] GIEC (2015). **Changements climatiques 2014 - rapport de synthèse**. Rapport technique.



- [Gong et al., 2011] Gong, Q., Midlam-Mohler, S., Marano, V., et Rizzoni, G. (2011). **An iterative markov chain approach for generating vehicle driving cycles**. *SAE Int. J. Engines*, 4 :1035–1045.
- [González-Longatt, 2006] González-Longatt, F. M. (2006). **Circuit based battery models : a review**. Dans *Congreso Iberoamericano de estudiantes De Ingenieria Electrica. Cibelec*.
- [Gustin et al., 2007] Gustin, F., et Berthon, A. (2007). **SOFT SWITCHING TECHNIQUES TO IMPROVE EFFICIENCY OF A NONRESONANT HF LINK DC-AC CONVERTER**. *International Journal of Power and Energy Systems*, 27(2).
- [Hammerschmidt, 2006] Hammerschmidt, A. E. (2006). **Fuel Cell Propulsion of Submarines**. Dans *Advanced Naval Propulsion Symposium*, volume 120, pages 1–7, Arlington.
- [Härkegård et al., 2005] Härkegård, O., et Glad, S. T. (2005). **Resolving actuator redundancy—optimal control vs. control allocation**. *Automatica*, 41(1) :137–144.
- [Hawke et al., 2011] Hawke, J., Enjeti, P., Palma, L., et Sarma, H. (2011). **A modular fuel cell with hybrid energy storage**. Dans *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, volume 3, pages 2971–2976. IEEE.
- [Higuita Cano et al., 2014] Higuita Cano, M., Kelouwani, S., Agbossou, K., et Dubé, Y. (2014). **Free air breathing proton exchange membrane fuel cell : Thermal behavior characterization near freezing temperature**. *Journal of Power Sources*, 246 :650–658.
- [Hou et al., 2011] Hou, Y., Yang, Z., et Fang, X. (2011). **An experimental study on the dynamic process of PEM fuel cell stack voltage**. *Renewable Energy*, 36(1) :325–329.
- [Howell, 2012] Howell, D. (2012). **Battery status and cost reduction prospects**. Rapport technique.
- [Huang et al., 2006] Huang, X., Solasi, R., Zou, Y., Feshler, M., Reifsnider, K., Condit, D., Burlatsky, S., et Madden, T. (2006). **Mechanical endurance of polymer electrolyte membrane and pem fuel cell durability**. *Journal of Polymer Science Part B : Polymer Physics*, 44(16) :2346–2357.
- [Incropera, 2002] Incropera, F. (2002). **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. John Wiley & Sons, New York City, fifth édition.
- [Jalil et al., 1997] Jalil, N., Kheir, N. A., et Salman, M. (1997). **A rule-based energy management strategy for a series hybrid vehicle**. Dans *Proceedings of the 1997 American Control Conference (Cat. No.97CH36041)*, volume 1, pages 689–693 vol.1.
- [Johansen et al., 2013] Johansen, T. A., et Fossen, T. I. (2013). **Control allocation—a survey**. *Automatica*, 49(5) :1087 – 1103.
- [Katz, 1991] Katz, M. (1991). **Reactant distribution for multi-stack fuel cell power plants**.
- [Klein et al., 1983] Klein, C. A., et Huang, C. H. (1983). **Review of pseudoinverse control for use with kinematically redundant manipulators**. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13(2) :245–250.

- [Kuhn et al., 1951] Kuhn, H. W., et Tucker, A. W. (1951). **Nonlinear programming**. Dans *Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, pages 481–492, Berkeley, Calif. University of California Press.
- [Laffly et al., 2007] Laffly, E., Pera, M. C., et Hissel, D. (2007). **Polymer electrolyte membrane fuel cell modelling and parameters estimation for ageing consideration**. Dans *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 180–185.
- [Liang et al., 2009] Liang, Z., Xin, Z., Yi, T., et Xinn, Z. (2009). **Intelligent energy management for parallel hev based on driving cycle identification using svm**. Dans *International workshop on IK formation security and application*, pages 457–460. Citeseer.
- [Liu et al., 2012] Liu, X., He, H., Xiong, R., et Qian, T. (2012). **Study on the Fault Tolerance Control Strategy of the Distributed Driving Electric Vehicle Running in Straight Line with Failure Motor(s)**. *2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012)*, pages 1627–1632.
- [Marx et al., 2014] Marx, N., Boulon, L., Gustin, F., Hissel, D., et Agbossou, K. (2014). **A review of multi-stack and modular fuel cell systems : Interests, application areas and on-going research activities**. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(23) :12101 – 12111.
- [Marx et al., 2017] Marx, N., Hissel, D., Gustin, F., Boulon, L., et Agbossou, K. (2017). **On the sizing and energy management of an hybrid multistack fuel cell – battery system for automotive applications**. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(2) :1518 – 1526.
- [Meyers et al., 2006] Meyers, J. P., et Darling, R. M. (2006). **Model of carbon corrosion in pem fuel cells**. *Journal of the Electrochemical Society*, 153(8) :A1432–A1442.
- [Moo et al., 2008] Moo, C.-s., Ng, K. S., Member, S., et Hsieh, Y.-c. (2008). **Parallel Operation of Battery Power Modules**. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(2) :701–707.
- [Musardo et al., 2005] Musardo, C., Rizzoni, G., Guezennec, Y., et Staccia, B. (2005). **A-ecms : An adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management**. *European Journal of Control*, 11(4) :509 – 524.
- [Onori et al., 2012] Onori, S., Spagnol, P., Marano, V., Guezennec, Y., et Rizzoni, G. (2012). **A new life estimation method for lithium-ion batteries in plug-in hybrid electric vehicles applications**. *International Journal of Power Electronics*, 4(3) :302–319.
- [Oppenheimer et al., 2006] Oppenheimer, M. W., Doman, D. B., et Bolender, M. a. (2006). **Control Allocation for Over-actuated Systems**. *2006 14th Mediterranean Conference on Control and Automation*, (2) :1–6.
- [Ozpineci et al., 2004] Ozpineci, B., et Tolbert, L. (2004). **Multiple input converters for fuel cells**. Dans *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.*, volume 2, pages 791–797. IEEE.



- [Ozpineci et al., 2009] Ozpineci, B., Tolbert, L., Adams, D., et Collins, D. (2009). **Integrating multiple solid oxide fuel cell modules**. Dans *IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No.03CH37468)*, volume 2, pages 1568–1573. IEEE.
- [Palma et al., 2009] Palma, L., et Enjeti, P. N. (2009). **A Modular Fuel Cell, Modular DC–DC Converter Concept for High Performance and Enhanced Reliability**. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(6) :1437–1443.
- [Patterson, 2002] Patterson, T. (2002). **Pre-print archive-american institute of chemical engineers**. Dans *Spring National Meeting, New Orleans, LA*, volume 313.
- [Pei et al., 2006] Pei, P., Ouyang, M., Feng, W., Lu, L., Huang, H., et Zhang, J. (2006). **Hydrogen pressure drop characteristics in a fuel cell stack**. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(3) :371–377.
- [Puterman, 2014] Puterman, M. L. (2014). **Markov decision processes : discrete stochastic dynamic programming**. John Wiley & Sons.
- [Qiu et al., 1999] Qiu, Q., et Pedram, M. (1999). **Dynamic power management based on continuous-time markov decision processes**. Dans *Proceedings of the 36th Annual ACM/IEEE Design Automation Conference, DAC '99*, pages 555–561, New York, NY, USA. ACM.
- [Reaves et al., ] Reaves, W., et Hoberecht, M. **PEM Fuel Cell Status and REmaining Challenges for Manned-Space-Flight Applications**. Rapport technique.
- [Resmi Suresh et al., 2016] Resmi Suresh, M., Sankaran, G., Joopudi, S., Narasimhan, S., Choudhury, S. R., et Rengaswamy, R. (2016). **Optimal Power Distribution Control for a Network of Fuel Cell Stacks**.
- [Schouten et al., 2003] Schouten, N. J., Salman, M. A., et Kheir, N. A. (2003). **Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic**. *Control Engineering Practice*, 11(2) :171 – 177. Automotive Systems.
- [Smith et al., 2007] Smith, K. A., Rahn, C. D., et Wang, C.-Y. (2007). **Control oriented 1d electrochemical model of lithium ion battery**. *Energy Conversion and management*, 48(9) :2565–2578.
- [Song et al., 2000] Song, R.-H., Kim, C.-S., et Shin, D. R. (2000). **Effects of flow rate and starvation of reactant gases on the performance of phosphoric acid fuel cells**. *Journal of Power Sources*, 86(1-2) :289–293.
- [Springer, 1991] Springer, T. E. (1991). **Polymer Electrolyte Fuel Cell Model**. *Journal of The Electrochemical Society*, 138(8) :2334.
- [Storn et al., 1997] Storn, R., et Price, K. (1997). **Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces**. *Journal of Global Optimization*, 11(4) :341–359.
- [Suttman, 2011] Suttman, A. K. (2011). **Lithium Ion Battery Aging Experiments and Algorithm Development for Life Estimation**. PhD thesis, The Ohio State University.
- [Tang et al., 2010] Tang, Y., Yuan, W., Pan, M., Li, Z., Chen, G., et Li, Y. (2010). **Experimental investigation of dynamic performance and transient responses of a kW-class PEM fuel cell stack under various load changes**. *Applied Energy*, 87(4) :1410–1417.

- [Taniguchi et al., 2004] Taniguchi, A., Akita, T., Yasuda, K., et Miyazaki, Y. (2004). **Analysis of electrocatalyst degradation in pemfc caused by cell reversal during fuel starvation.** *Journal of Power Sources*, 130(1) :42–49.
- [Thounthong et al., 2009] Thounthong, P., Raël, S., et Davat, B. (2009). **Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications.** *Journal of Power Sources*, 193(1) :376 – 385. Scientific Advances in Fuel Cell Systems.
- [Wahdame et al., 2008] Wahdame, B., Girardot, L., Hissel, D., Harel, F., Francois, X., Candusso, D., Pera, M. C., et Dumercy, L. (2008). **Impact of power converter current ripple on the durability of a fuel cell stack.** Dans *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 1495–1500. IEEE.
- [Wang et al., 2011] Wang, R., et Lukic, S. M. (2011). **Review of driving conditions prediction and driving style recognition based control algorithms for hybrid electric vehicles.** Dans *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE*, pages 1–7. IEEE.
- [Yang et al., 2014] Yang, Y. P., Shih, Y. C., et Chen, J. M. (2014). **Real-time driving strategy for a pure electric vehicle with multiple traction motors by particle swarm optimization.** *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*, 2014(628 CP) :3.2.06–3.2.06.
- [Yi et al., 2009] Yi, T., Xin, Z., Liang, Z., et Xinn, Z. (2009). **Intelligent energy management based on driving cycle identification using fuzzy neural network.** Dans *Computational Intelligence and Design, 2009. ISCID'09. Second International Symposium on*, volume 2, pages 501–504. IEEE.
- [Zhao et al., 2015] Zhao, R., Liu, J., et Gu, J. (2015). **The effects of electrode thickness on the electrochemical and thermal characteristics of lithium ion battery.** *Applied Energy*, 139 :220 – 229.
- [Zhao et al., 2011] Zhao, Y., Li, W., He, X., Ieee, F., Zhang, Y., et Ma, H. (2011). **Performance analysis of high conversion ratio converter with switched capacitor and voltage gain extension cell.** Dans *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 1519–1523. IEEE.

# TABLE DES FIGURES

1.1	Prévisions du GIEC pour les températures et le niveau des eau à l'horizon 2100 [GIEC, 2015] . . . . .	4
1.2	Le système pile à combustible . . . . .	7
1.3	Institut de Recherche sur l'Hydrogène . . . . .	8
1.4	FCLAB . . . . .	9
2.1	Profil de tension en charge intermittente. (Extrait de [Moo et al., 2008]) .	13
2.2	Types de systèmes PAC multi-pile . . . . .	15
2.3	Architectures fluidiques proposées dans [Assabumrungrat et al., 2009] . .	16
2.4	(a) Influence de la tension d'opération sur la puissance fournie [Assabumrungrat et al., 2009], (b) Influence de la tension d'opération sur la puissance nette [Assabumrungrat et al., 2009] . . . . .	16
2.5	Architectures fluidiques proposées par [Katz, 1991] . . . . .	17
2.6	Les configurations électriques d'adaptation de puissance pour systèmes PAC multi-pile . . . . .	18
2.7	Adaptation de puissance avec transformateurs . . . . .	19
2.8	(a) Courbe de polarisation adaptée de [Hawke et al., 2011], (b) Courbe de puissance adaptée de [Hawke et al., 2011] . . . . .	20
2.9	Dérivation par diodes : (a) architectures série, (b) stack segmenté [Frappé, 2012] . . . . .	22
2.10	distribution daisy-chain . . . . .	26
2.11	Banc de test multi-pile . . . . .	26
2.12	Comparaison du rendement obtenu expérimentalement avec les trois méthodes de distribution . . . . .	27
2.13	Comparaison du rendement obtenu théoriquement avec les trois méthodes de distribution . . . . .	27
3.1	Némo . . . . .	35
3.2	Architecture électrique du Némo . . . . .	36
3.3	Structure d'une cellule de pile à combustible . . . . .	37
3.4	REM du sous-système électrochimie . . . . .	40

3.5	Représentation du circuit fluide et circuit équivalent du sous-système d'apport en air . . . . .	41
3.6	REM du sous-système d'apport en air . . . . .	42
3.7	Représentation du circuit fluide et circuit équivalent du sous-système d'apport en hydrogène . . . . .	42
3.8	REM du sous-système d'apport en hydrogène . . . . .	43
3.9	Arrangement d'ailettes . . . . .	43
3.10	REM du sous-système thermique . . . . .	44
3.11	REM du sous-système convertisseur de puissance . . . . .	45
3.12	Composition d'un ventilateur . . . . .	45
3.13	REM du sous-système convertisseur de puissance . . . . .	46
3.14	Ordre de la modélisation par circuit équivalent . . . . .	47
3.15	REM du sous-système batterie . . . . .	47
3.16	Système hybride pile à combustible / batterie . . . . .	48
3.17	Banc de test . . . . .	49
3.18	Courbes de polarisation - bleue : expérimentale, rouge : simulation . . . .	50
3.19	Cycle de conduite : profils de vitesse et de puissance . . . . .	51
3.20	Comportement du stack - bleue : expérimentale, rouge : simulation . . . .	51
3.21	Pertes dans le convertisseur statique en fonction de la puissance en sortie .	52
4.1	Cycle urbain . . . . .	58
4.2	Cycle rural . . . . .	58
4.3	Cycle autoroutier . . . . .	58
4.4	Rendement du système PAC . . . . .	62
4.5	Processus d'optimisation lié à la programmation dynamique . . . . .	68
4.6	(a) - cas où les discrétisations des actions et de l'état de charge permettent de faibles erreurs d'interpolation. (b) - cas où les discrétisations des actions et de l'état de charge entraînent des erreurs d'interpolation élevées .	71
4.7	Profils de puissance pile et état de charge de la batterie pour le dimensionnement A. De haut en bas : cycles urbain, rural et autoroutier. Trait fin : multi-pile, trait épais : monopile. . . . .	73
4.8	Profils de puissance pile et état de charge de la batterie pour le dimensionnement B. De haut en bas : cycles urbain, rural et autoroutier. Trait pointillé : multi-pile, trait plein : monopile. . . . .	74



4.9	Profils de puissance pile et état de charge de la batterie pour le dimensionnement C. De haut en bas : cycles urbain, rural et autoroutier. Trait pointillé : multi-pile, trait plein : monopile. . . . .	75
4.10	Profils de puissance pile et état de charge de la batterie pour le dimensionnement D. De haut en bas : cycles urbain, rural et autoroutier. Trait pointillé : multi-pile, trait plein : monopile. . . . .	76
4.11	Profils de puissance pile et état de charge de la batterie pour le dimensionnement E. De haut en bas : cycles urbain, rural et autoroutier. Trait pointillé : multi-pile, trait plein : monopile. . . . .	77
4.12	Histogramme des valeurs de puissances pour les profil optimaux pour chaque dimensionnement dans le cadre du cycle autoroutier - systèmes monopile. Du haut vers le bas : cas d'étude AS, BS, CS, DS, ES et profil de charge. . . . .	80
4.13	Histogramme des valeurs de puissances pour les profil optimaux pour chaque dimensionnement dans le cadre du cycle autoroutier - systèmes multi-pile. Du haut vers le bas : cas d'étude AM, BM, CM, DM, EM et profil de charge. . . . .	81
4.14	Répartition du coût moyen en fonction du dimensionnement. Du haut vers le bas : cycle urbain, rural, autoroutier et moyenne pondérée des trois cycles.	82
4.15	Rendement d'un système PAC usuel [Basualdo et al., 2012] . . . . .	84
5.1	Les 3 modules de la stratégie de gestion énergétique présentée . . . . .	87
5.2	Evolution du type de conduite pour les trois cycles de références . . . . .	88
5.3	Fonction sigmoïde utilisée . . . . .	89
5.4	Modèle paramétré aux pile du banc d'essai de l'IRH : (a) pile 1, (b) pile 2, (c) pile 3 et (d) pile 4 . . . . .	94
5.5	Partitionnement des cycles de références en fonction des types de conduite ( 0 : arrêt, 1 : urbain, 2 : rural, 3 : autoroutier, 4 : accélération, 5 : décélération). . . . .	97
5.6	Chaines de Markov pour les différents types de conduite . . . . .	99
5.7	Cycles créés (trait pointillé) et cycles de références (trait plein) - a :cycle urbain, b : cycle rural, c : cycle autoroutier . . . . .	100
5.8	Stratégie de gestion énergétique basée sur une machine d'état. (adapté de [Marx et al., 2017]) . . . . .	103
5.9	Profils de puissance pour les cycles urbain, rural, autoroutier, standardisé numéro 1. noir : décision bayésienne, rouge long : fonction de transfert, rouge court : basée sur les règles . . . . .	104
5.10	Coût d'exploitation en fonction du cycle de conduite . . . . .	105
5.11	Ratio de dégradation (rapporté à la stratégie bayésienne) du système PAC multi-pile en fonction du cycle de conduite . . . . .	106



5.12	Ratio de dégradation (rapporté à la stratégie bayésienne) du pack batterie en fonction du cycle de conduite . . . . .	107
5.13	Etat de charge final en fonction du cycle de conduite . . . . .	108
B.1	Profils de puissance individuels optimaux pour le dimensionnement A et le cycle urbain. Unité de puissance : 10kW . . . . .	136
B.2	Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement A et le cycle rural. Unité de puissance : 10kW . . . . .	137
B.3	Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement A et le cycle autoroutier. Unité de puissance : 10kW . . . . .	138
B.4	Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement B et le cycle urbain. Unité de puissance : 10kW . . . . .	139
B.5	Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement B et le cycle rural. Unité de puissance : 10kW . . . . .	140
B.6	Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement B et le cycle autoroutier. Unité de puissance : 10kW . . . . .	141
B.7	Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement C et le cycle urbain. Unité de puissance : 15kW . . . . .	142
B.8	Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement C et le cycle rural. Unité de puissance : 15kW . . . . .	143
B.9	Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement C et le cycle autoroutier. Unité de puissance : 15kW . . . . .	144
B.10	Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement D et le cycle urbain. Unité de puissance : 20kW . . . . .	145
B.11	Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement D et le cycle rural. Unité de puissance : 20kW . . . . .	146
B.12	Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement D et le cycle autoroutier. Unité de puissance : 20kW . . . . .	147
B.13	Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement E et le cycle urbain. Unité de puissance : 25kW . . . . .	148
B.14	Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement E et le cycle rural. Unité de puissance : 25kW . . . . .	149
B.15	Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement E et le cycle autoroutier. Unité de puissance : 25kW . . . . .	150
D.1	Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - urbain 1-5 . . . . .	160
D.2	Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - urbain 6-10 . . . . .	161

D.3	Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - rural 1-5 . . . . .	162
D.4	Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - rural 6-10 . . . . .	163
D.5	Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - autoroutier 1-5 . . . . .	164
D.6	Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - autoroutier 6-10 . . . . .	165
D.7	Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - inconnu 1-5 . . . . .	166
D.8	Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - inconnu 6-10 . . . . .	167
E.1	Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 40% . . . . .	170
E.2	Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 41% . . . . .	171
E.3	Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 42% . . . . .	172
E.4	Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 43% . . . . .	173
E.5	Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 44% . . . . .	174
E.6	Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 45% . . . . .	175
E.7	Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 46% . . . . .	176
E.8	Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 47% . . . . .	177
E.9	Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 48% . . . . .	178
E.10	Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 49% . . . . .	179
E.11	Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 50% . . . . .	180
E.12	Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 51% . . . . .	181
E.13	Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 52% . . . . .	182

E.14 Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 53% . . . . .	183
E.15 Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 54% . . . . .	184
E.16 Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 55% . . . . .	185
E.17 Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 56% . . . . .	186
E.18 Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 57% . . . . .	187
E.19 Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 58% . . . . .	188
E.20 Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 59% . . . . .	189
E.21 Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 60% . . . . .	190

# LISTE DES TABLES

1.1	Consommation énergétique en France (2012) pour les différents secteurs du transport (Mtep : méga-tonnes équivalent pétrole) [Finke et al., 2014].	5
2.1	Comparaison du rendement global entre l'optimisation en temps réel et l'optimisation globale)	12
2.2	Comparaison du rendement global obtenu pour les différentes architectures (aucune valeur lorsque l'architecture ne permet pas d'effectuer le cycle)	12
2.3	Gain en puissance maximal obtenu grâce à l'architecture segmentée	20
2.4	Thématiques abordées par les 21 travaux de l'étude	23
3.1	Constante de temps des phénomènes influant sur la tension	39
3.2	Paramètres du modèle	53
4.1	Répartition des cycles de conduite ARTEMIS	57
4.2	Contraintes de dimensionnement	59
4.3	Dimensionnements étudiés	60
4.4	Dénomination des cas d'étude	61
4.5	Paramètres de discrétisation	70
4.6	Consommation en hydrogène par cycle (en g)	72
4.7	Dégradation des systèmes PAC par cycle (en % de durée de vie)	78
4.8	Dégradation de la batterie par cycle (en % de durée de vie)	78
4.9	Nombre de démarrages pour les systèmes multi-pile	78
4.10	Coût total optimal par cycle (en \$)	79
5.1	Méthodes adaptées aux stratégies de gestion énergétiques	85
5.2	Distribution temporelle des types de conduite observés	98
5.3	Détails des cycles de conduite	101
5.4	Détails des cycles de conduite	109
B.1	Dimensionnements étudiés	135



# IV

## ANNEXES





## PROGRAMMATION DYNAMIQUE ET CALCUL HAUTE PERFORMANCE

Les simulations à effectuer dans le cadre de la programmation peuvent être effectuées en parallèle car elles ne sont pas inter-dépendantes. Disposant d'un pool de calcul parallèle composé de 128 nœuds, nous avons choisis de répartir les calculs par rapport à l'état de charge considéré. L'espace de variation de l'état de charge étant discrétisé en 512 valeurs, chaque nœud est responsable des calculs correspondant à 4 état de charge différent. Il est également nécessaire de répartir l'espace mémoire (facteur limitant dans notre étude) et les variables. Ici, nous avons opté pour une distribution équilibré des 512 Go de mémoire vive pour chaque noeuds (4 Go par noeud).

L'implémentation de l'algorithme a été effectué sous java. Java dispose de l'interface OPENmpi lui permettant d'utiliser des ressources de calcul haute performances en exécution parallèle. L'utilisation de l'interface impose la désignation d'un nœud maitre et de nœuds esclaves. Le nœud maitre a pour charge de distribuer les ordres de calcul aux nœuds esclaves et d'exécuter la partie principale de l'algorithme. Il effectuera aussi une partie des calculs de simulation. Les nœuds esclaves ont pour unique tache d'effectuer les calculs de simulation requis par le nœud maitre. Les noeuds esclaves reçoivent alors les données nécessaire de la part du noeud maitre ou des autre noeuds esclaves afin d'effectuer les calculs. Il est nécessaire de noter que le protocole de communication impose un format vectoriel des données transmises. Les matrices et tenseurs stockant les données à transmettre doivent donc être transformés en vecteurs.

Le débogage de l'application reste très complexe car il n'est pas possible d'utiliser les outils d'exécution pas à pas disponible habituellement. Toutefois, afin de ne pas d'utiliser le temps de calcul alloué sur le centre de calcul pour le débogage, il est possible de transformer sa propre machine en calculateur parallèle. Pour cela il est nécessaire d'avoir une machine fonctionnant sous Linux et possédant un processeur multi-coeur. Après débogage local, certains problèmes peuvent apparaitre lors de l'exécuter sur le cluster. En effet, le cluster n'a pas la même architecture qu'un processeur multi-coeur et le protocole de communication entre les différentes machines le composant peut ne pas être adapté aux code développés en local. Il sera alors nécessaire de contacter un technicien du cluster afin d'adapter le code à ce dernier.

Toutefois, en fonction du cluster de calcul, il peut exister un langage de programmation privilégié. Dans le cadre du cluster utilisé pour ces travaux, il se trouve que Java n'est

pas le langage le plus approprié et que d'autres solutions telles que le C aurait permit une communication plus performante entre les différents noeuds du cluster.

Finalement, dans le but d'augmenter la puissance de calcul disponible, il serait possible d'utiliser un cluster composé de GPU plutôt que de CPU pour obtenir plus de noeuds et donc une parallélisation plus importante. Cela permettrait d'affiner les calculs et donc d'obtenir des résultats plus proches de l'optimum réel ou d'augmenter la quantité de calcul totale pouvant être effectué (nombre de PAC composant le système multi-pile).

## PROFILS DE PUISSANCE INDIVIDUELS OPTIMAUX

Les résultats présentés ici ont été obtenus grâce à la programmation dynamique. Pour chaque cas d'étude, les profils de puissance pour les 4 stacks du système sont représentés. Voici un rappel des dimensionnements considérés :

TABLE B.1 – Dimensionnements étudiés

Dimensionnement	Cas A	Cas B	Cas C	Cas D	Cas E
<b>Puissance maximale - système PAC (kW)</b>	40	40	60	80	100
<b>Puissance maximale - batterie (kW)</b>	100	60	40	20	20
<b>Puissance totale (kW)</b>	140	100	100	100	120
<b>Taux d'hybridation (-)</b>	0.71	0.60	0.40	0.20	0.17

Pour chacun de ces dimensionnements les 3 cycles de conduites ARTEMIS ont été considérés.

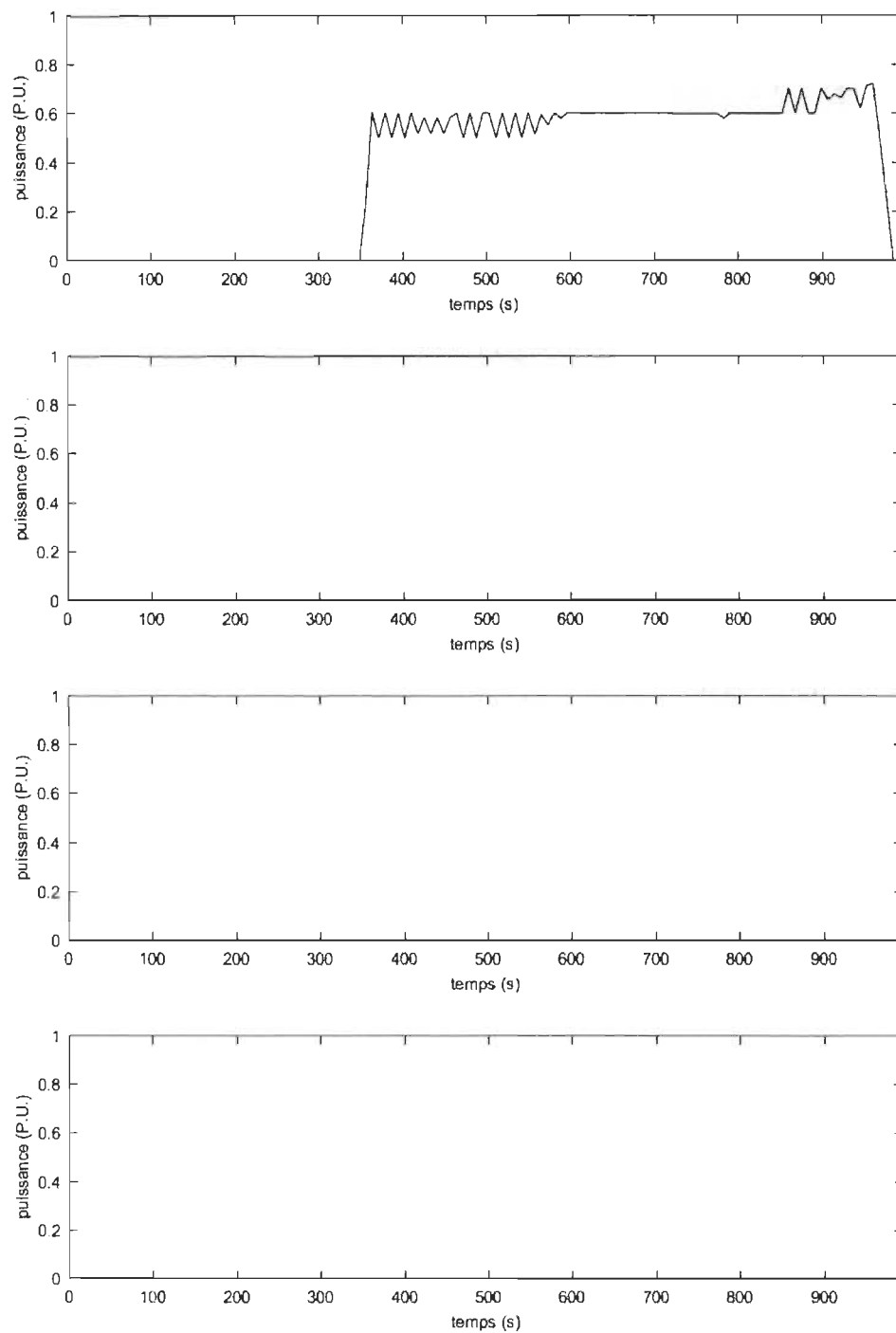


FIGURE B.1 – Profils de puissance individuels optimaux pour le dimensionnement A et le cycle urbain. Unité de puissance : 10kW

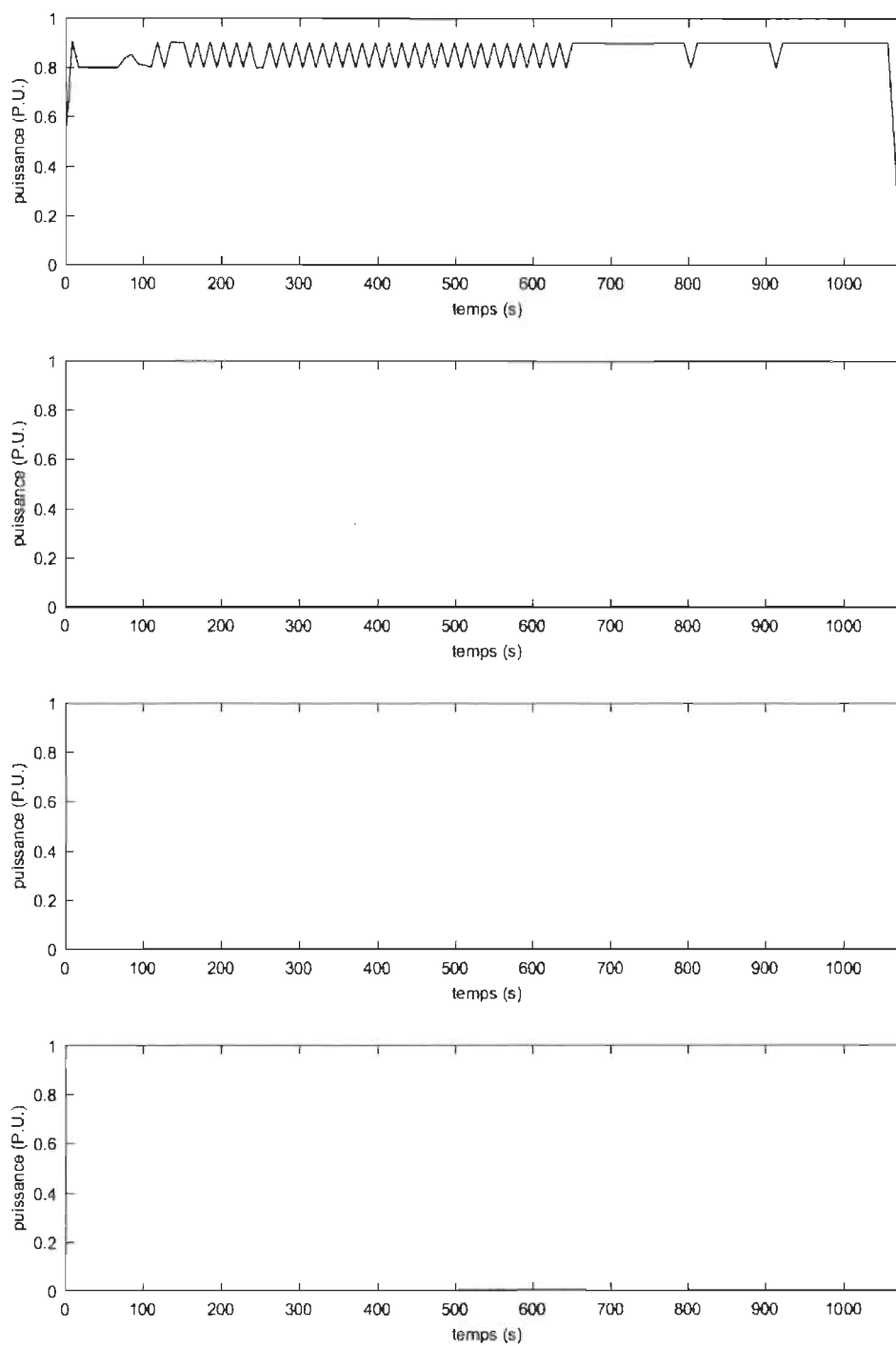


FIGURE B.2 – Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement A et le cycle rural. Unité de puissance : 10kW

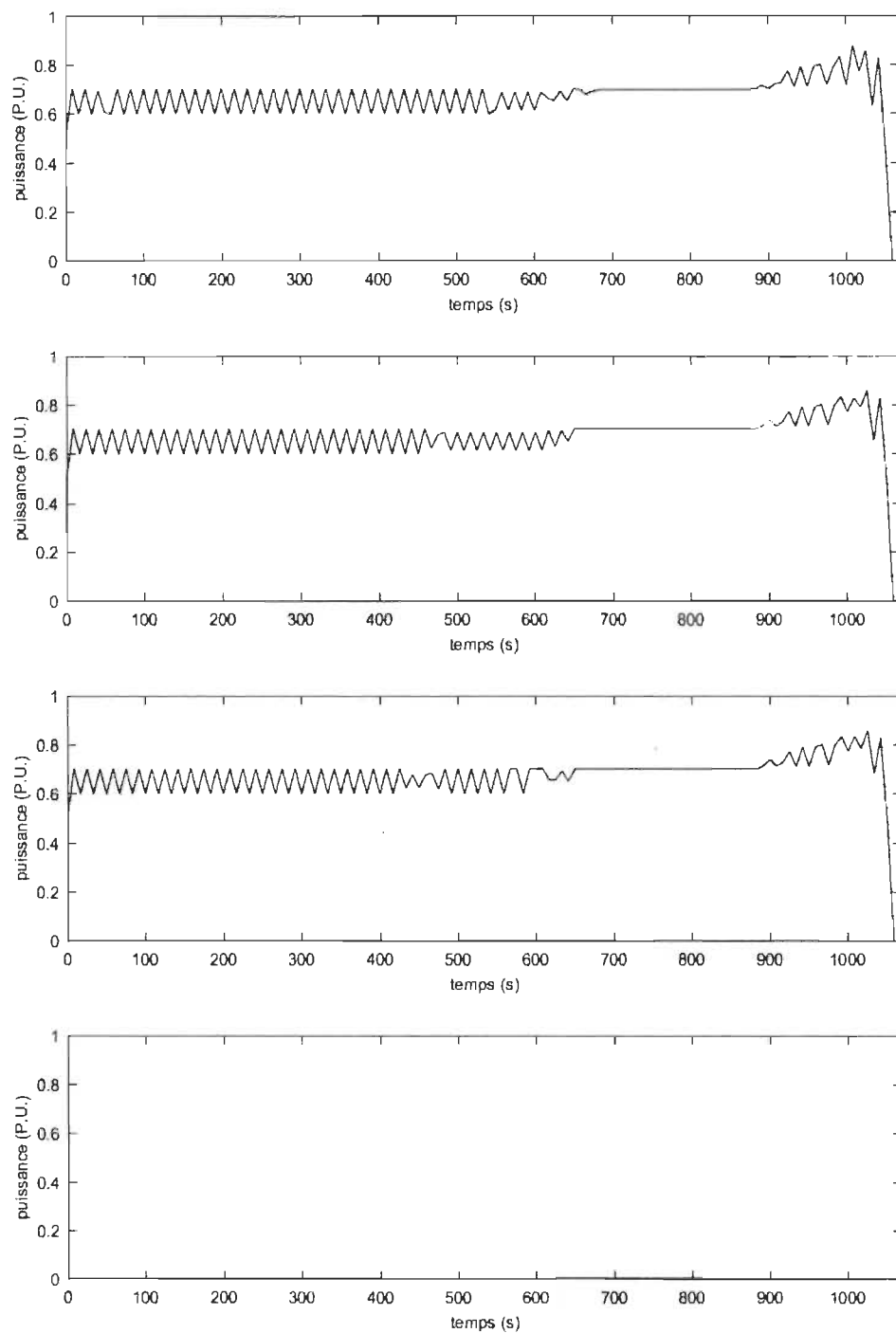


FIGURE B.3 – Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement A et le cycle autoroutier. Unité de puissance : 10kW

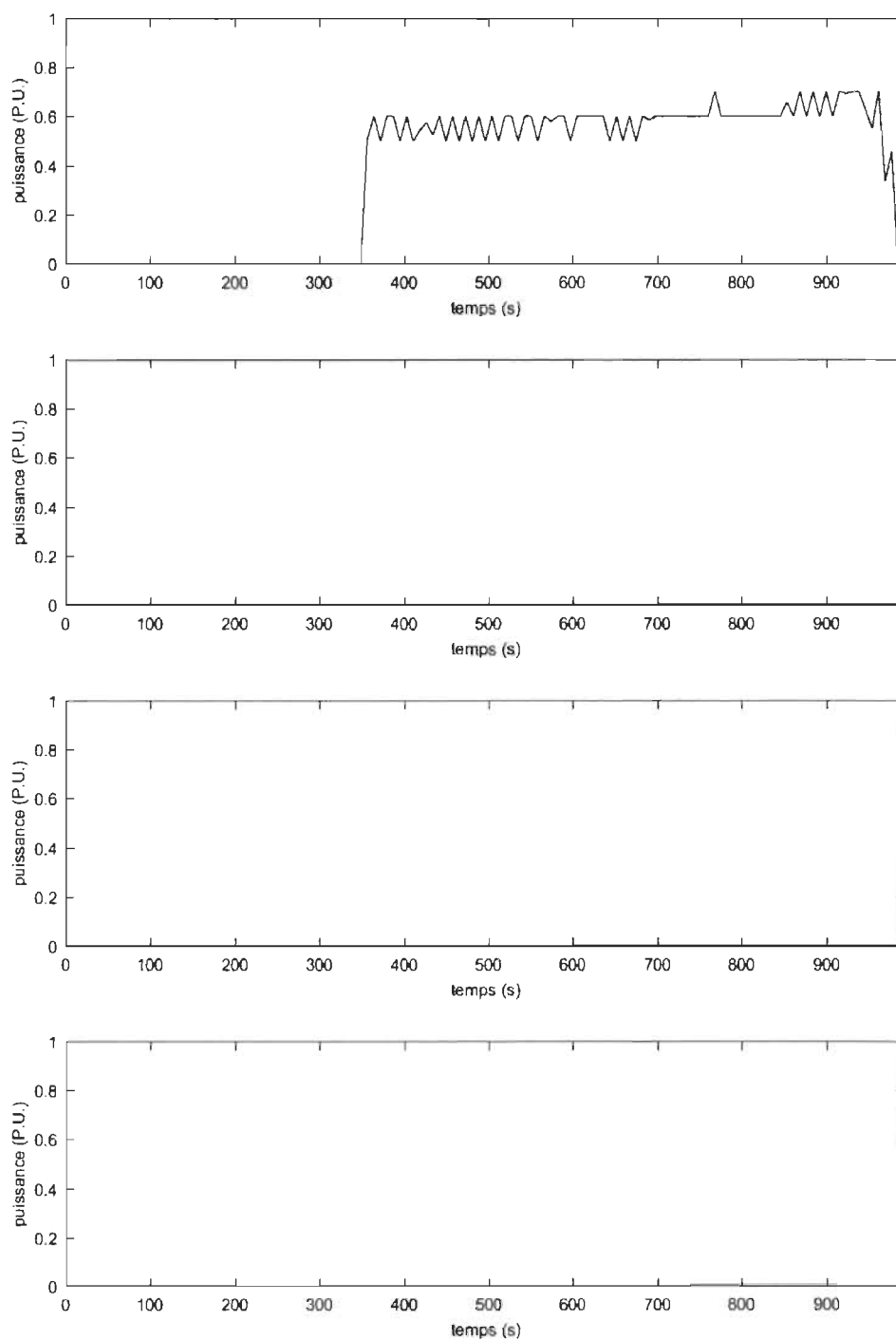


FIGURE B.4 – Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement B et le cycle urbain. Unité de puissance : 10kW



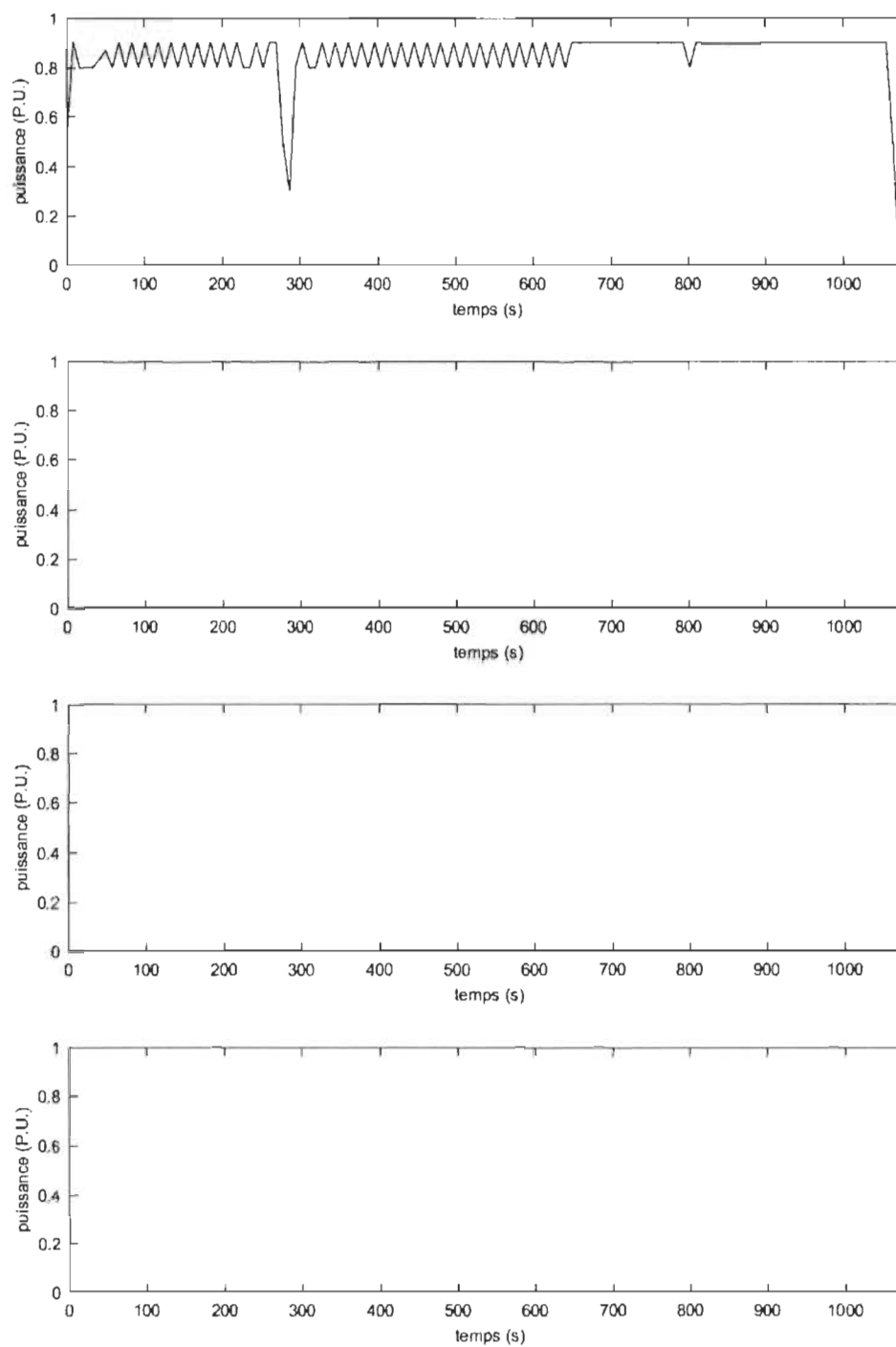


FIGURE B.5 – Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement B et le cycle rural. Unité de puissance : 10kW

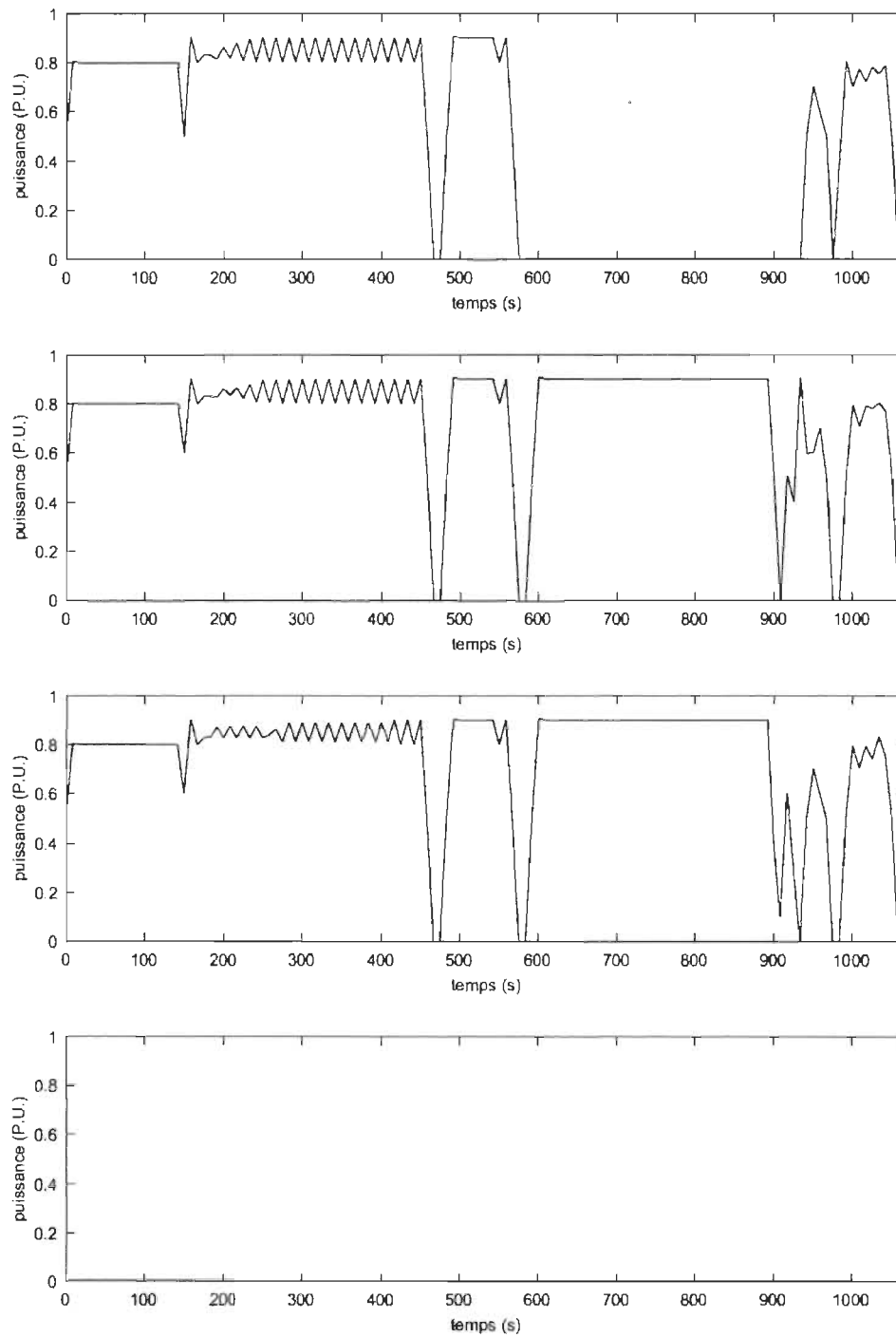


FIGURE B.6 – Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement B et le cycle autoroutier. Unité de puissance : 10kW

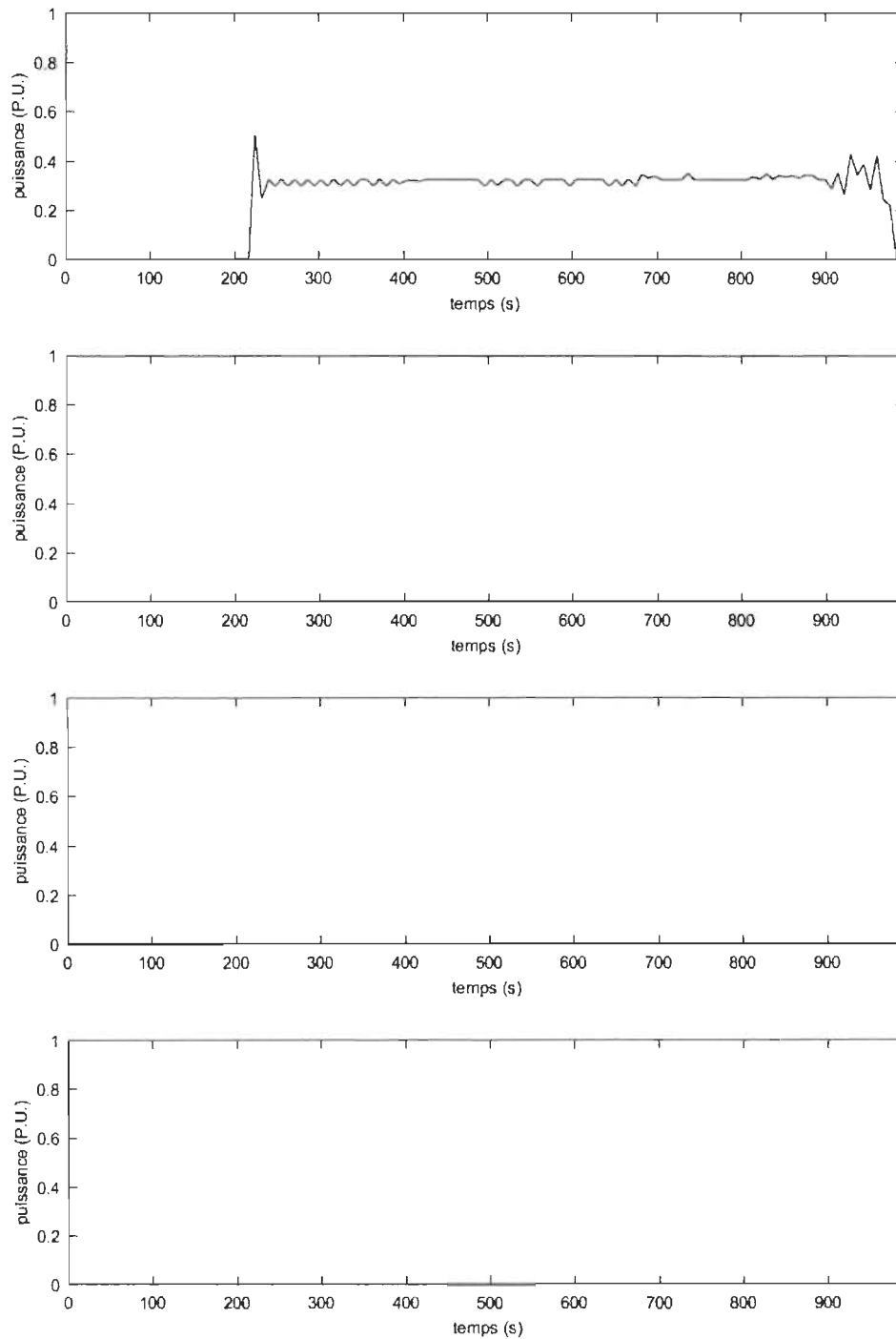


FIGURE B.7 – Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement C et le cycle urbain. Unité de puissance : 15kW

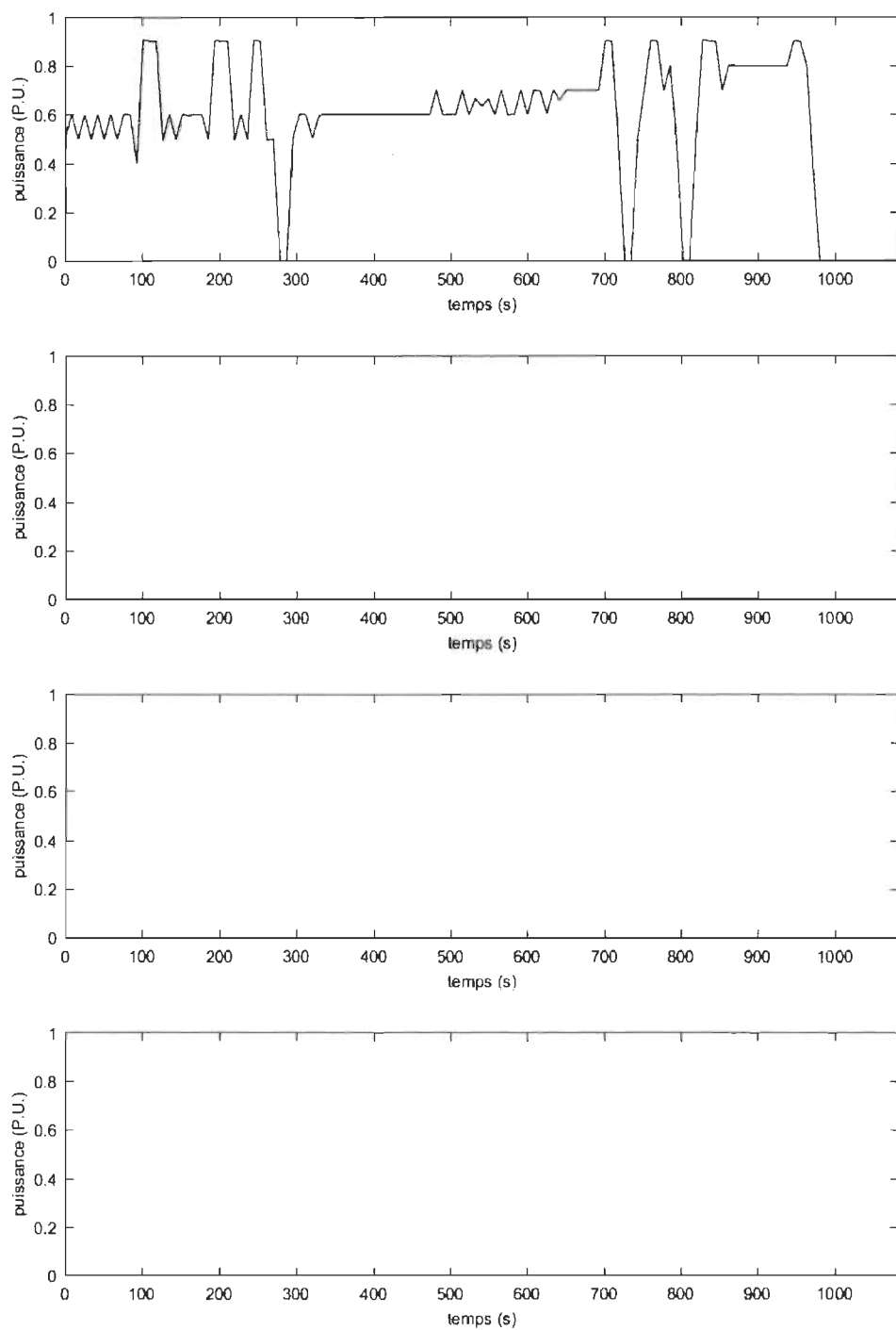


FIGURE B.8 – Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement C et le cycle rural. Unité de puissance : 15kW

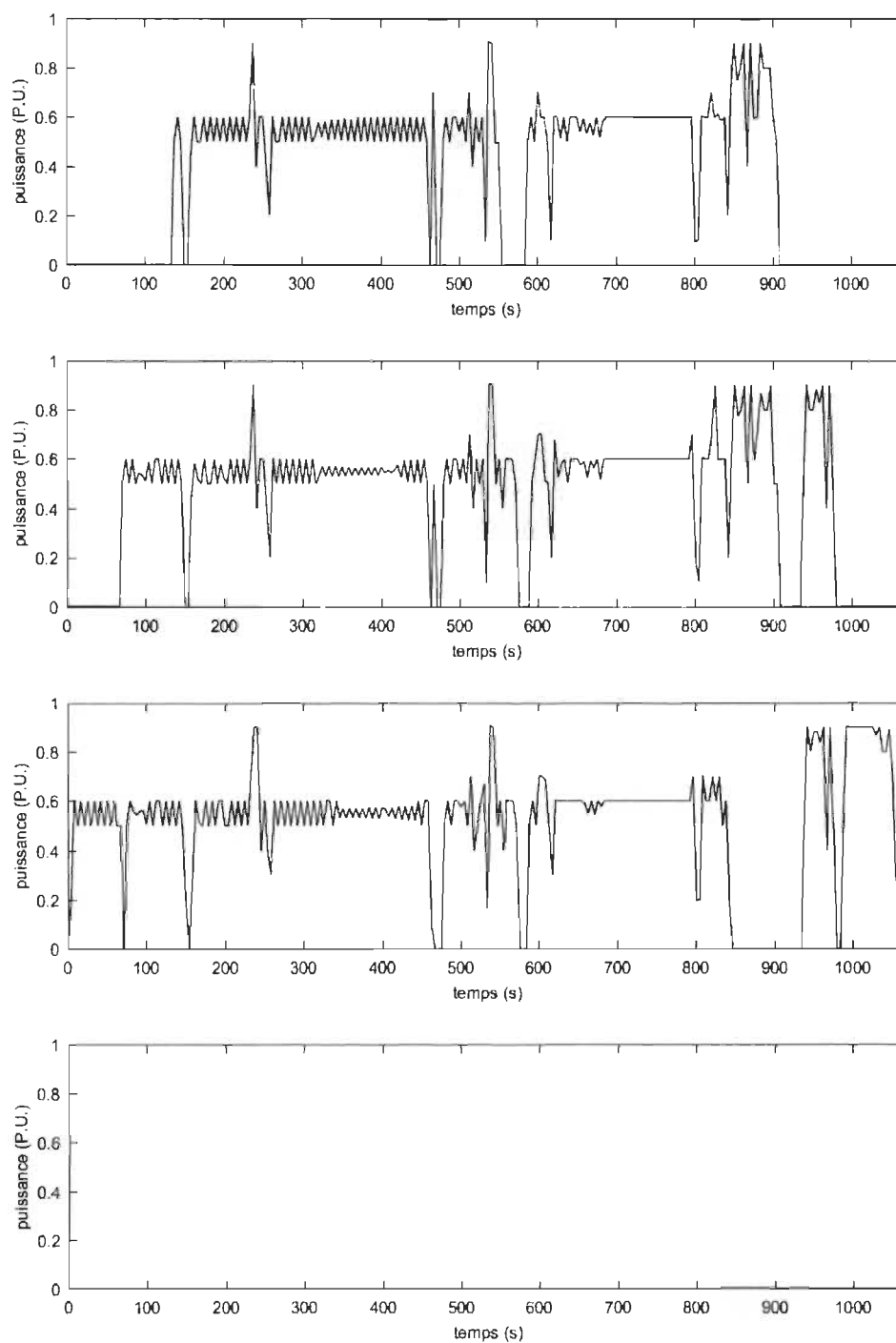


FIGURE B.9 – Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement C et le cycle autoroutier. Unité de puissance : 15kW

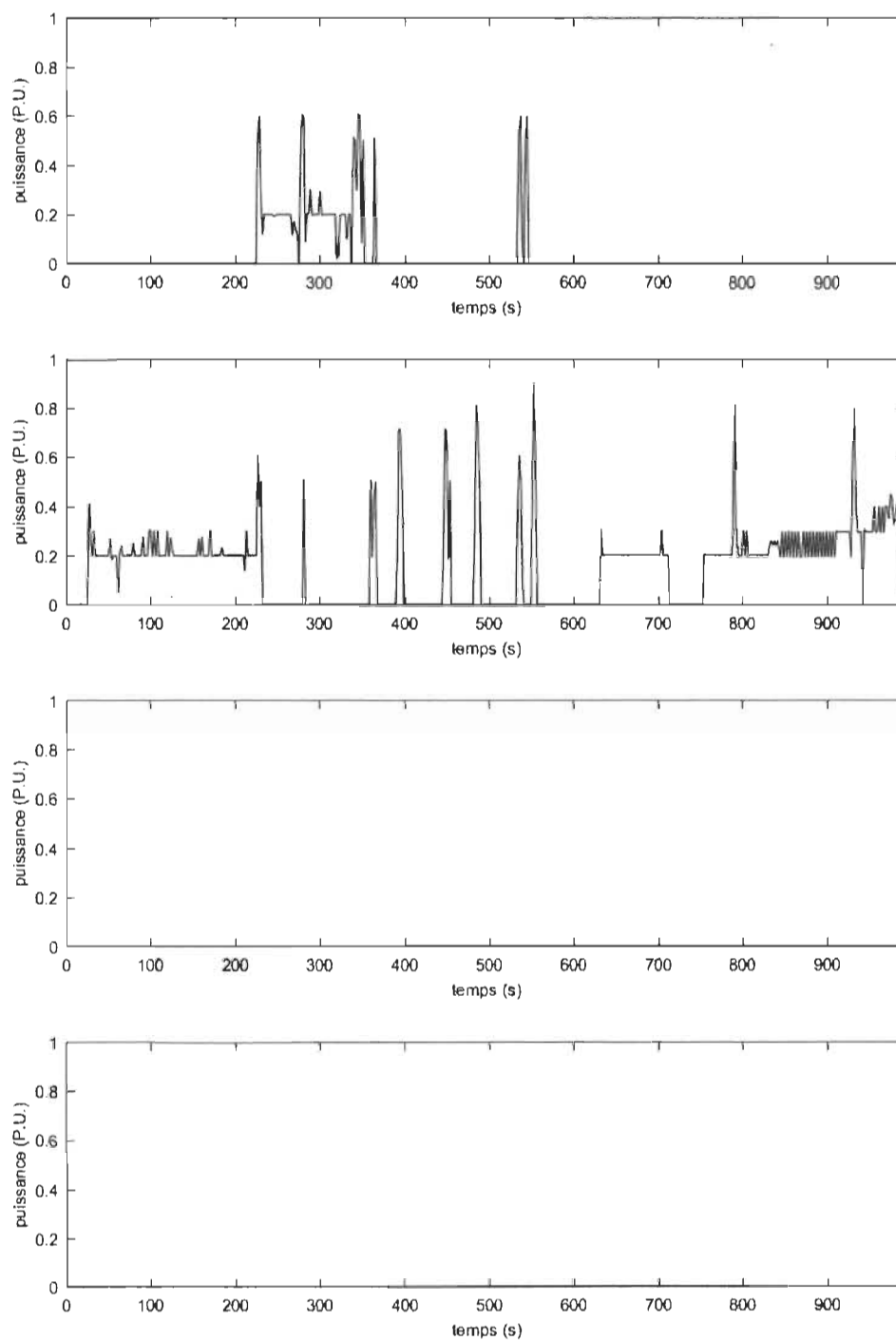


FIGURE B.10 – Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement D et le cycle urbain. Unité de puissance : 20kW

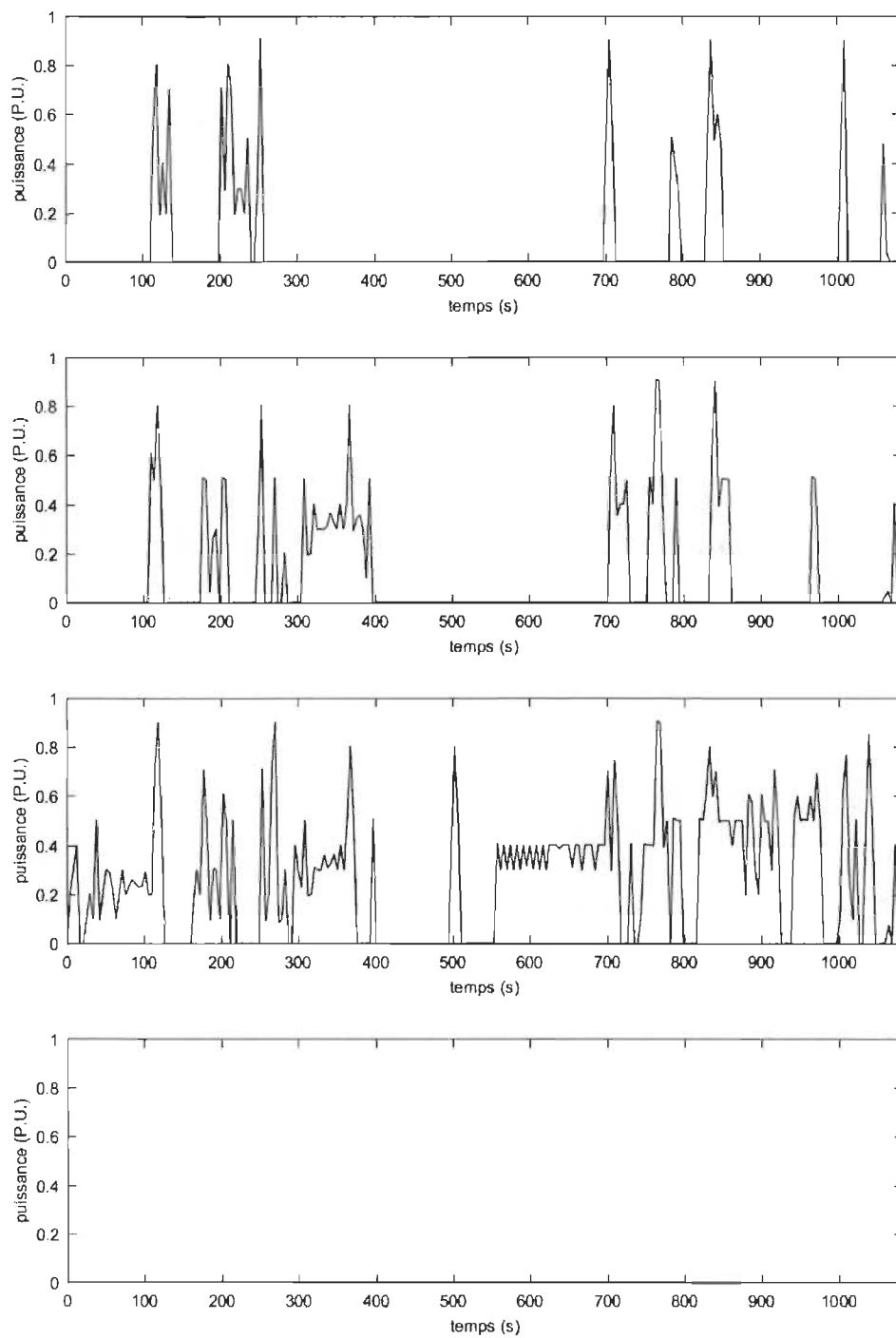


FIGURE B.11 – Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement D et le cycle rural. Unité de puissance : 20kW



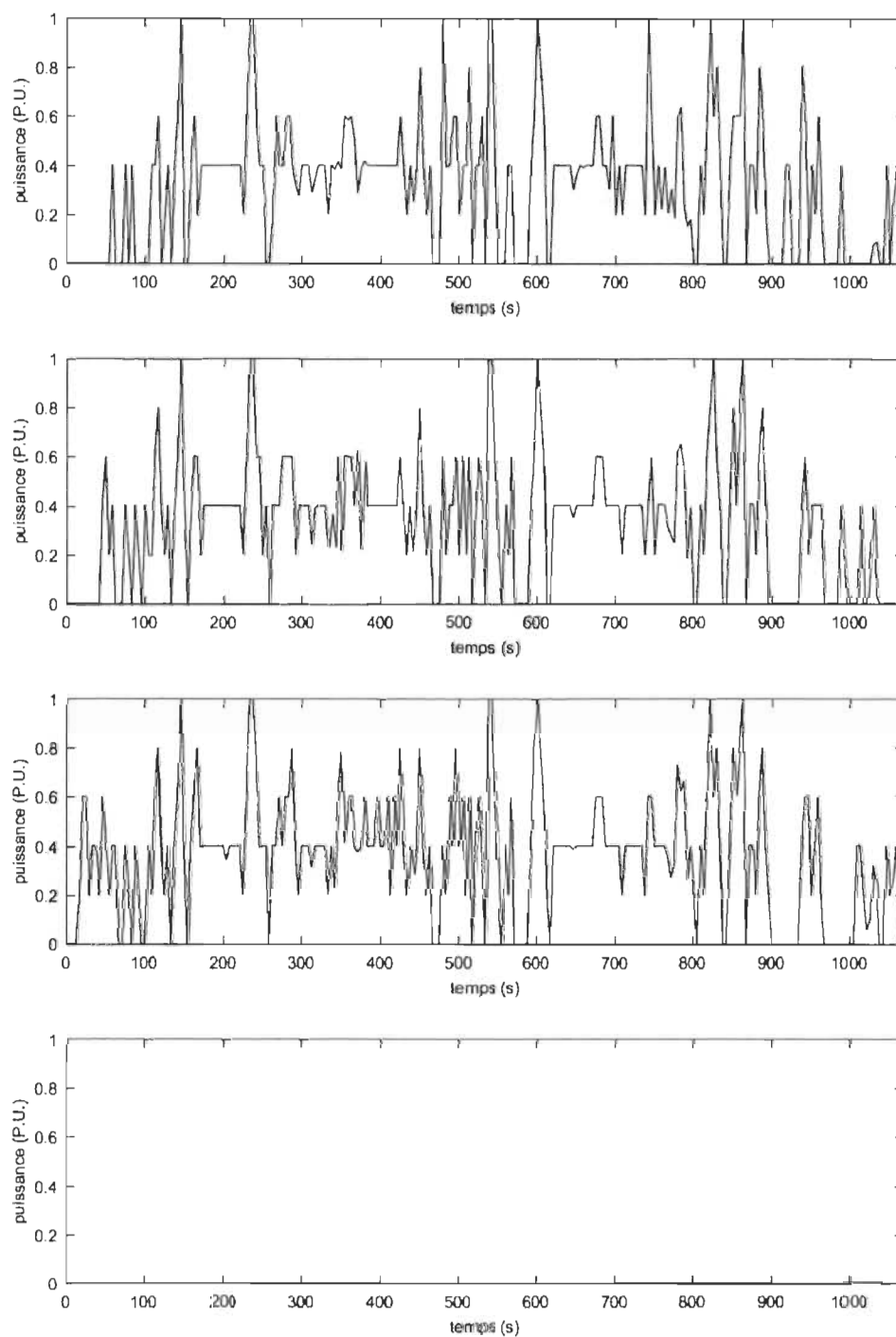


FIGURE B.12 – Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement D et le cycle autoroutier. Unité de puissance : 20kW

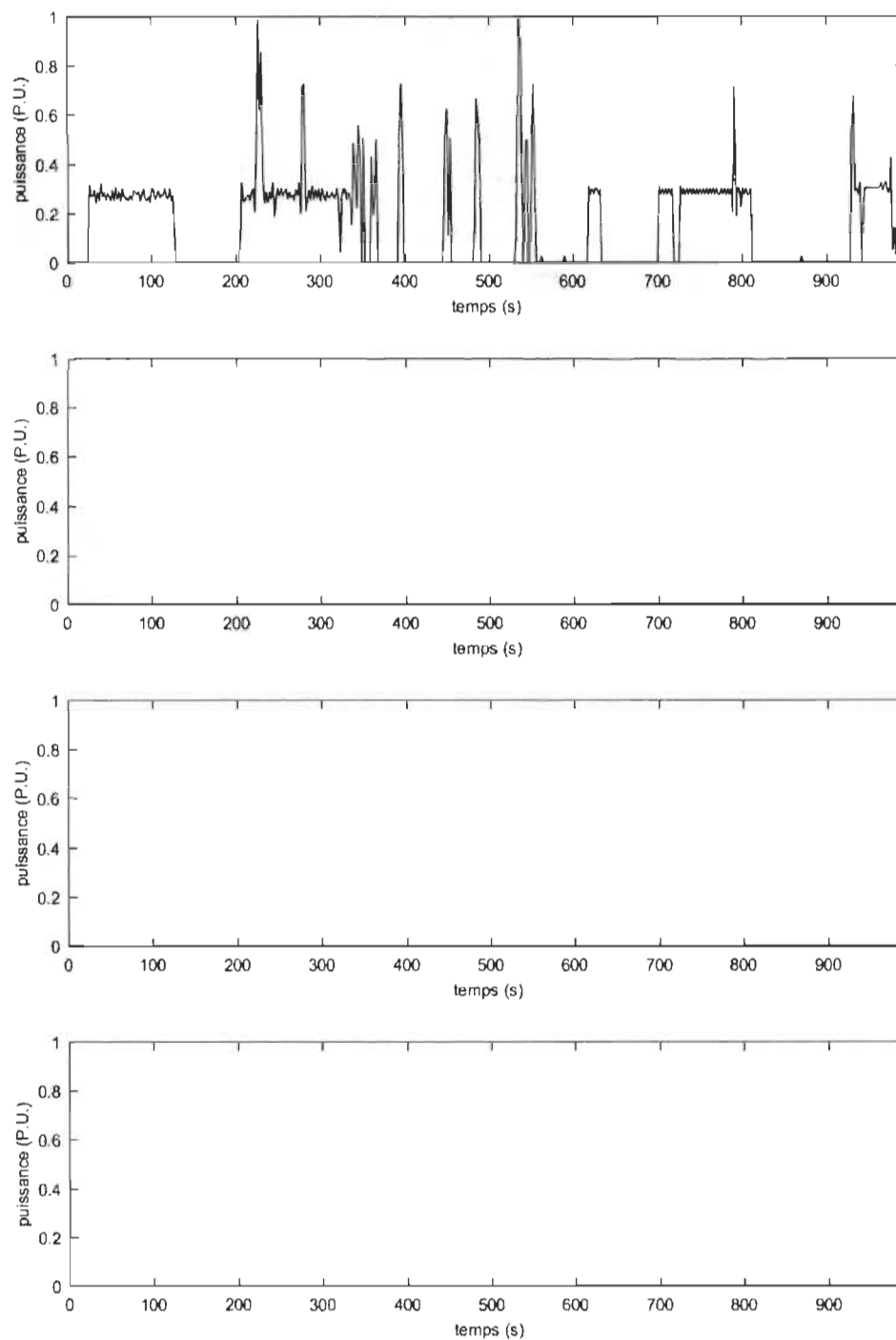


FIGURE B.13 – Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement E et le cycle urbain. Unité de puissance : 25kW

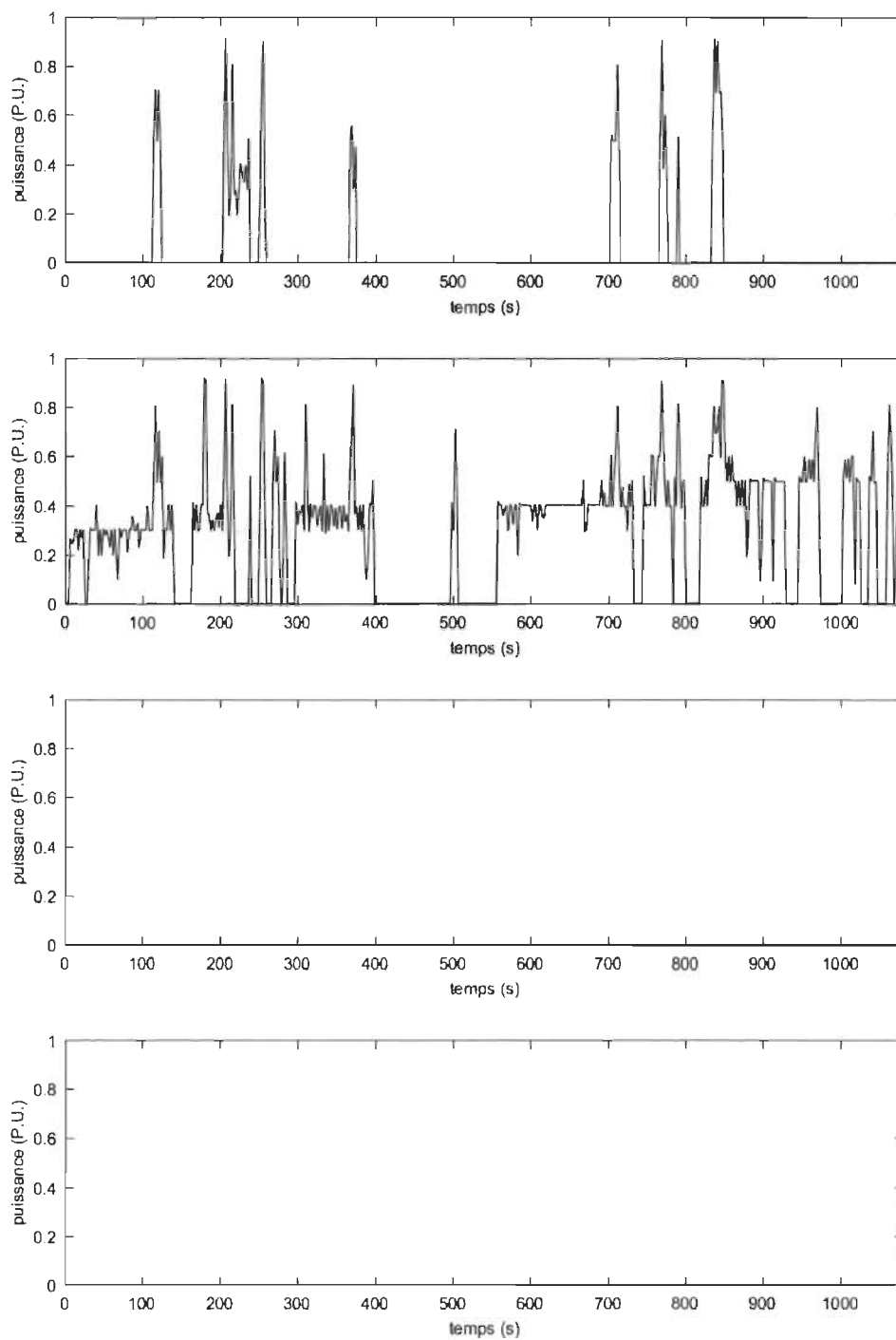


FIGURE B.14 – Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement E et le cycle rural. Unité de puissance : 25kW

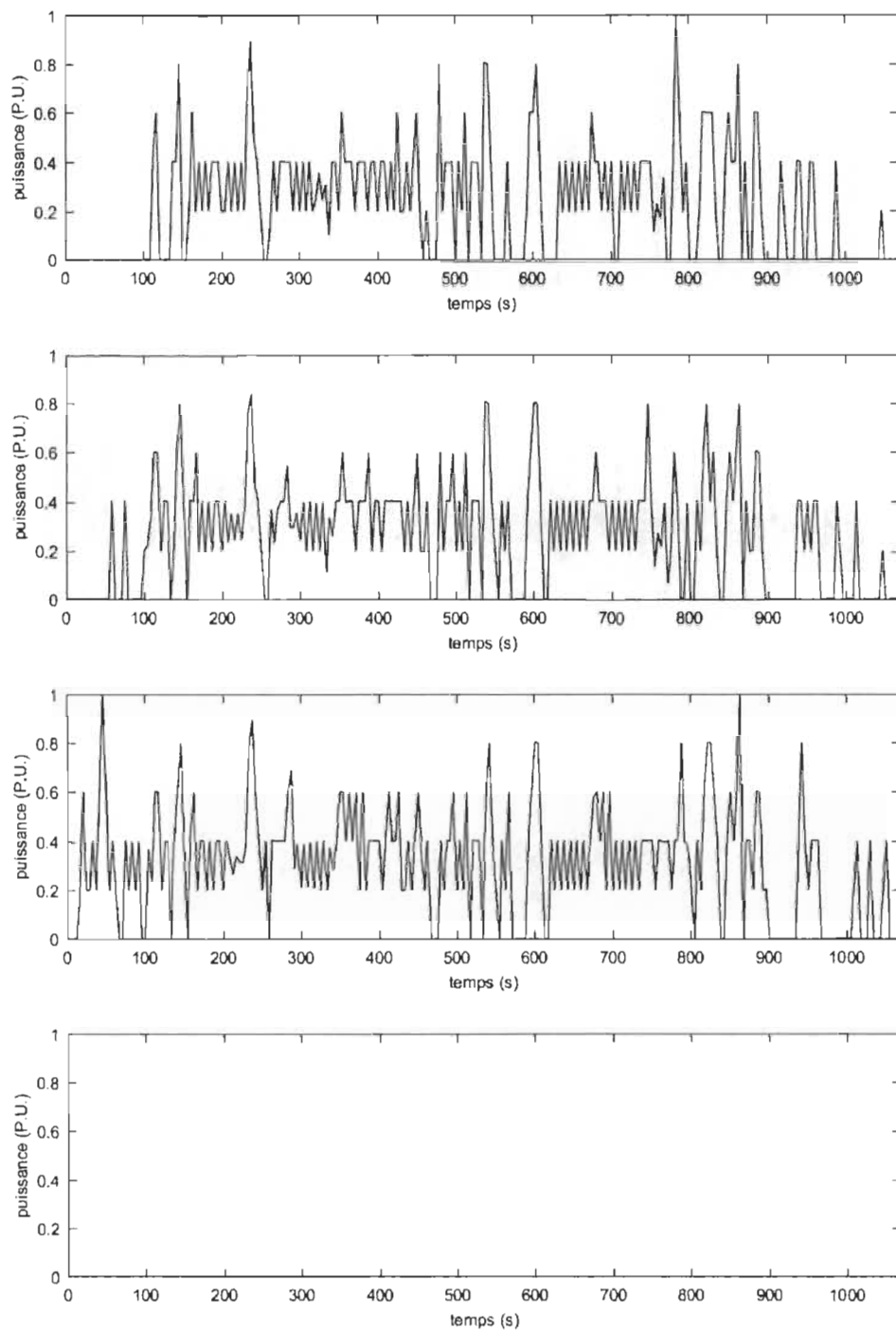


FIGURE B.15 – Profils de puissance individuel optimaux pour le dimensionnement E et le cycle autoroutier. Unité de puissance : 25kW

## DISTRIBUTION DE PUISSANCE OPTIMALE

Dans cette annexe, nous présenterons la méthodologie de résolution et d'implémentation algorithmique du problème de distribution de puissance présenté dans le chapitre 5.

### C.1/ CONDITIONS DE KARUSH-KUHN-TUCKER

Pour adopter le formalisme des conditions de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) nous reprendrons les notations suivantes :

Soit  $h : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$  tel que :

$$h(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^m P_i - P_{tot} \quad (\text{C.1})$$

Cette fonction  $h$  représente le respect des contraintes égalités du problème d'optimisation.

Soit  $g : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^{2m}$  tel que :

$$\forall i \in \llbracket 1, m \rrbracket, g_i(\mathbf{P}) = P_i - P_{max,i}^{(c)} \quad (\text{C.2})$$

$$\forall i \in \llbracket m+1, 2m \rrbracket; g_{i+m}(\mathbf{P}) = P_{min,i}^{(c)} - P_i \quad (\text{C.3})$$

Cette fonction  $g$  représente le respect des contraintes inégalités du problème d'optimisation.

Le problème d'optimisation satisfait la condition de Slater. En effet le problème est convexe et il existe un point vérifiant les contraintes. Les conditions de KKT nous donnent alors que :

## Conditions de Karush-Kuhn-Tucker

$\exists \lambda \in \mathbb{R}, \exists \mu \in \mathbb{R}^{2m}$  tels que :

1.  $\mu \geq 0$
2.  $\nabla\left(\sum_{i=1}^m D_i(P_i^*)\right) + \lambda \nabla h(\mathbf{P}^*) + \mu \nabla g(\mathbf{P}^*) = 0$
3.  $\mu \cdot g(\mathbf{P}^*) = 0$
4.  $h(\mathbf{P}^*) = 0$
5.  $g(\mathbf{P}^*) \leq 0$

Pour pouvoir résoudre ce problème il faut introduire les ensembles suivants :

Soit  $A_{sup} = \{i \in \llbracket 1, m \rrbracket \text{ tels que } P_i = P_{max,i}^{(c)}\}$ .

Soit  $A_{inf} = \{i \in \llbracket 1, m \rrbracket \text{ tels que } P_i = P_{min,i}^{(c)}\}$ .

Soit  $A_{act} = A_{sup} \cup A_{inf}$ .

La condition (C.4) permet de définir les éléments constituant l'ensemble  $A_{sup}$ . Ainsi l'élément  $i$  fait partie de cet ensemble si et seulement si,

$$P_{tot} > \sum_{j \in \overline{A_{act}}} P_{max,\sigma(j)}^{(r)} + \sum_{j \in A_{sup}} P_{max,\sigma(j)}^{(c)} + \sum_{j \in A_{inf}} P_{min,\sigma(j)}^{(c)} - \alpha_{A_{act},i} (P_{max,i}^{(r)} - P_{max,i}^{(c)}) \quad (C.4)$$

où  $P_{max,\sigma(j)}^{(r)} = V_{0,\sigma(j)}^2 / (4R_{\sigma(j)})$  est la puissance maximale théorique atteignable par le stack  $\sigma(j)$  et :

$$\alpha_{A_{act},i} = \sum_{j \in \overline{A_{act}}} \frac{R_i}{R_{\sigma(j)}} \left( \frac{B_{1,\sigma(j)}}{B_{1,i}} \right)^2 \quad (C.5)$$

La condition (C.6) permet de définir les éléments constituant l'ensemble  $A_{sup}$ . Ainsi l'élément  $i$  fait partie de cette ensemble si et seulement si,

$$P_{tot} < \sum_{j \in \overline{A_{act}}} P_{max,\sigma(j)}^{(r)} + \sum_{j \in A_{sup}} P_{max,\sigma(j)}^{(c)} + \sum_{j \in A_{inf}} P_{min,\sigma(j)}^{(c)} - \alpha_{A_{act},i} (P_{max,i}^{(r)} - P_{min,i}^{(c)}) \quad (C.6)$$

Le reste des puissances non déterminées sont définies par l'équation suivante :

$$P_i = P_{max,i}^{(r)} - \frac{1}{\alpha_{A_{act},i}} \left( \sum_{j \in \overline{A_{act}}} P_{max,\sigma(j)}^{(r)} - \left( P_{tot} - \sum_{j \in A_{sup}} P_{max,\sigma(j)}^{(c)} - \sum_{j \in A_{inf}} P_{min,\sigma(j)}^{(c)} \right) \right) \quad (C.7)$$

Toutefois, la définition des conditions (C.4) et (C.6) portant sur les éléments des ensembles  $A_{sup}$  et  $A_{inf}$  ne permet pas de les définir mais uniquement de vérifier leur validité.

Il faudra donc tester les différentes possibilités et retenir la plus intéressante vis-à-vis de la consommation en hydrogène.

## C.2/ INTRODUCTION DE LA CONSOMMATION DES AUXILIAIRES

L'introduction de la consommation des différents auxiliaires du système influe sur le problème d'optimisation qui devient alors :

Problème d'optimisation : prise en compte de la consommation des auxiliaires

$$\mathbf{P}^* = \arg \max_{\mathbf{P}} (\eta)$$

sous contraintes :

$$\sum_{i=1}^n (P_i - P_{aux,i}) = P_{tot}$$

$$\mathbf{P}_{\min}^{(c)} \leq \mathbf{P} \leq \mathbf{P}_{\max}^{(c)}$$

où  $P_{aux,i}$  est la puissance consommée par les auxiliaires du stack  $i$ .

Afin de pouvoir résoudre ce problème d'optimisation en utilisant les conditions de KKT, nous utiliserons la modélisation suivante pour la puissance consommée par les auxiliaires :

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, P_{aux,i}(P_i) = P_{0,i} + k_i P_i \quad (\text{C.8})$$

De la même manière qu'à la section précédente le problème sera reformulé en :



Problème d'optimisation : prise en compte de la consommation des auxiliaires - version développée

$$[\mathbf{P}^*, m^*] = \arg \min_m \left( \arg \min_{\mathbf{P}} \left( \sum_{i=1}^m D_i(P_i) \right) \right)$$

Où

$$D_i(P_i) = \left( \beta_{0,i} + \beta_{1,i} \frac{V_0^2}{4R} \right) - \beta_{1,i} \sqrt{\frac{\frac{V_0^2}{4R} - P_i}{R}}$$

sous contraintes :

$$\sum_{i=1}^m (P_i - P_{aux,i}(P_i)) = P_{tot}$$

$$\mathbf{P}_{\min}^{(c)} \leq \mathbf{P} \leq \mathbf{P}_{\max}^{(c)}$$

Où  $\sigma$  est une permutation de  $\llbracket 1, n \rrbracket$ .

On utilisera les mêmes ensembles  $A_{inf}$ ,  $A_{sup}$  et  $A_{act}$  que précédemment. La fonction  $h$  aura la forme suivante :

$$h(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^m (P_i - P_{aux,i}(P_i)) - P_{tot} \quad (\text{C.9})$$

On retrouvera des conditions similaires à celles obtenues dans le cas précédent. Ainsi la définition de l'ensemble  $A_{sup}$  sera validée par l'équation (C.10). L'élément  $i$  fait partie de cette ensemble si et seulement si,

$$P_{tot} > S P_{max, A_{act}}^{(r, pertes)} + S P_{max, A_{sup}}^{(c, pertes)} + S P_{min, A_{inf}}^{(c, pertes)} - \alpha_{A_{act}, i} (P_{max, i}^{(r)} - P_{max, i}^{(c)}) \quad (\text{C.10})$$

Où

$$S P_{max, A_{act}}^{(r, pertes)} = \sum_{i \in A_{act}} (P_{max, i}^{(r)} - P_{0, i} - k_i P_{max, i}^{(r)}) \quad (\text{C.11})$$

$$S P_{max, A_{sup}}^{(c, pertes)} = \sum_{i \in A_{sup}} (P_{max, i}^{(c)} - P_{0, i} - k_i P_{max, i}^{(c)}) \quad (\text{C.12})$$

$$S P_{min, A_{inf}}^{(c, pertes)} = \sum_{i \in A_{inf}} (P_{min, i}^{(c)} - P_{0, i} - k_i P_{min, i}^{(c)}) \quad (\text{C.13})$$

$$\alpha_{A_{act}, i} = (1 - k_i) \sum_{j \in A_{act}} \frac{R_i}{R_{\sigma(j)}} \frac{1 - k_i}{1 - k_{\sigma(j)}} \left( \frac{B_{1, \sigma(j)}}{B_{1, i}} \right)^2 \quad (\text{C.14})$$

La condition (C.15) permet de définir les éléments constituant l'ensemble  $A_{sup}$ . Ainsi l'élément  $i$  fait partie de cette ensemble si et seulement si,

$$P_{tot} < S P_{max, A_{act}}^{(r, pertes)} + S P_{max, A_{sup}}^{(c, pertes)} + S P_{min, A_{inf}}^{(c, pertes)} - \alpha_{A_{act}, i} (P_{max, i}^{(r)} - P_{min, i}^{(c)}) \quad (C.15)$$

Le reste des puissances non déterminées sont définies par l'équation suivante :

$$P_i = P_{max, i}^{(r)} - \frac{1}{\alpha_{A_{act}, i}} (S P_{max, A_{act}}^{(r, pertes)} - (P_{tot} - S P_{max, A_{sup}}^{(c, pertes)} - S P_{min, A_{inf}}^{(c, pertes)})) \quad (C.16)$$

### C.3/ INTERPRÉTATION

Les résultats obtenus ne permettent pas de déterminer la combinaison de pile ayant une contrainte en puissance saturée au point de rendement maximal. Ils ne permettent que de valider la véracité de la combinaison choisie et finalement de définir les puissances fournies par les piles n'ayant pas une contrainte saturée.

D'après l'équation (C.10), on remarque que plus le coefficient  $\alpha_i$  est grand plus la pile  $i$  est sollicitée. De même, d'après l'équation (C.15), plus  $\alpha_i$  est petit moins la pile  $i$  est sollicitée. Le coefficient  $\alpha$  permet donc de caractériser la qualité d'une pile d'après notre modèle.

Toutefois d'autres paramètres rentrent en compte dans la caractérisation des ensembles  $A_{inf}$  et  $A_{max}$ . On ne peut donc pas se baser sur les coefficients  $\alpha$  pour les déterminer.

### C.4/ IMPLÉMENTATION ALGORITHMIQUE

On a donc besoin d'explorer l'ensemble des solutions et d'en retenir la plus intéressante vis-à-vis de la consommation en hydrogène. Nous définirons les éléments suivants pour ne pas surcharger l'algorithme. Soit  $\Sigma_A^k$ , l'ensemble des fonctions injectives croissantes de  $\llbracket 1, k \rrbracket$  dans l'ensemble discret  $A$ . Soient

$$C_{inf}(n) = \bigwedge_{i=1}^n \left( P_{tot} < S P_{max, A_{act}}^{(r, pertes)} + S P_{max, A_{sup}}^{(c, pertes)} + S P_{min, A_{inf}}^{(c, pertes)} - \alpha_{A_{act}, i} (P_{max, i}^{(r)} - P_{min, i}^{(c)}) \right)$$

$$C_{sup}(n) = \bigwedge_{i=1}^n \left( P_{tot} > S P_{max, A_{act}}^{(r, pertes)} + S P_{max, A_{sup}}^{(c, pertes)} + S P_{min, A_{inf}}^{(c, pertes)} - \alpha_{A_{act}, i} (P_{max, i}^{(r)} - P_{max, i}^{(c)}) \right)$$

$$C_{free}(n) = C_{free, inf}(\sigma, n) \wedge C_{free, sup}(\sigma, n)$$

où  $\wedge$  est l'opérateur booléen *and* et

$$C_{free,inf}(n) = \bigwedge_{i=1}^n \left( P_{tot} > S P_{max,A_{act}}^{(r,pertes)} + S P_{max,A_{sup}}^{(c,pertes)} + S P_{min,A_{inf}}^{(c,pertes)} - \alpha_{A_{act},i} \left( P_{max,i}^{(r)} - P_{min,i}^{(c)} \right) \right)$$

$$C_{free,sup}(n) = \bigwedge_{i=1}^n \left( P_{tot} < S P_{max,A_{act}}^{(r,pertes)} + S P_{max,A_{sup}}^{(c,pertes)} + S P_{min,A_{inf}}^{(c,pertes)} - \alpha_{A_{act},i} \left( P_{max,i}^{(r)} - P_{max,i}^{(c)} \right) \right)$$

L'algorithme requis est le suivant :

```

for  $N_{min} \leftarrow 1$  to  $n$  do
   $S_{min} = \llbracket 1, n \rrbracket$  ;
  for  $\sigma_{min} \in \Sigma_{S_{min}}^{N_{min}}$  do
     $S P_{min,A_{inf}}^{(c,pertes)} = \sum_{i=1}^{N_{min}} \left( (1 - k_{\sigma_{min}(i)}) P_{min,\sigma_{min}(i)}^{(c)} - P_{0,\sigma_{min}(i)} \right)$ ;
    for  $N_{max} \leftarrow 1$  to  $n - N_{min}$  do
       $S_{max} = S_{min} / \sigma_{min}(S_{min})$  ;
      for  $\sigma_{max} \in \Sigma_{S_{max}}^{N_{max}}$  do
         $S P_{max,A_{sup}}^{(c,pertes)} = \sum_{i=1}^{N_{max}} \left( (1 - k_{\sigma_{max}(i)}) P_{max,\sigma_{max}(i)}^{(c)} - P_{0,\sigma_{max}(i)} \right)$ ;
         $N_{free} \leftarrow n - N_{min} - N_{max}$ ;
         $S_{free} \leftarrow S_{max} / \sigma_{max}(S_{max})$ ;
        for  $\sigma_{free} \in \Sigma_{S_{free}}^{N_{free}}$  do
          if  $C_{inf}(\sigma_{min}, N_{min})$  and  $C_{sup}(\sigma_{max}, N_{max})$  and  $C_{free}(\sigma_{free}, N_{free})$  then
             $P_{restant} = P_{tot} - S P_{max,A_{sup}}^{(c,pertes)} - S P_{min,A_{inf}}^{(c,pertes)}$  ;
            for  $i \leftarrow 1$  to  $N_{free}$  do
               $P_{\sigma(i)} = P_{max,\sigma(i)}^{(r)} - \frac{1}{\alpha_{A_{act},i}} \left( S P_{max,A_{act}}^{(r,pertes)} - P_{restant} \right)$ ;
            end
             $D[j] \leftarrow \sum_{i=1}^{N_{min}} D_{\sigma_{min}(i)} + \sum_{i=1}^{N_{max}} D_{\sigma_{max}(i)} + \sum_{i=1}^{N_{free}} D_{\sigma_{free}(i)}$ ;
          end
        end
      end
    end
  end
   $D_{min} \leftarrow \min(D)$ ;
   $index \leftarrow \arg \min(D)$  ;
   $P \leftarrow P[index]$ ;
end

```

**Algorithme 1 :** Recherche de la distribution optimale

L'algorithme teste toutes les permutations de stack en contrainte min ou max et évalue leurs validités vis-à-vis des conditions de KKT. Ensuite l'algorithme évalue le rendement de chacune des solutions valables puis détermine la meilleure d'entre elles.



## CYCLES DE CONDUITE CONSIDÉRÉS

Les cycles de conduite créés ou choisis pour cette étude sont présentés dans cette annexe. Pour les comportements urbain, rural et autoroutier 10 profils ont été créés. Les profils normalisés ont été choisis parmi les profils normalisés disponibles dans la bibliothèque de l'outil ADVISOR dans le but d'offrir une bonne diversité.

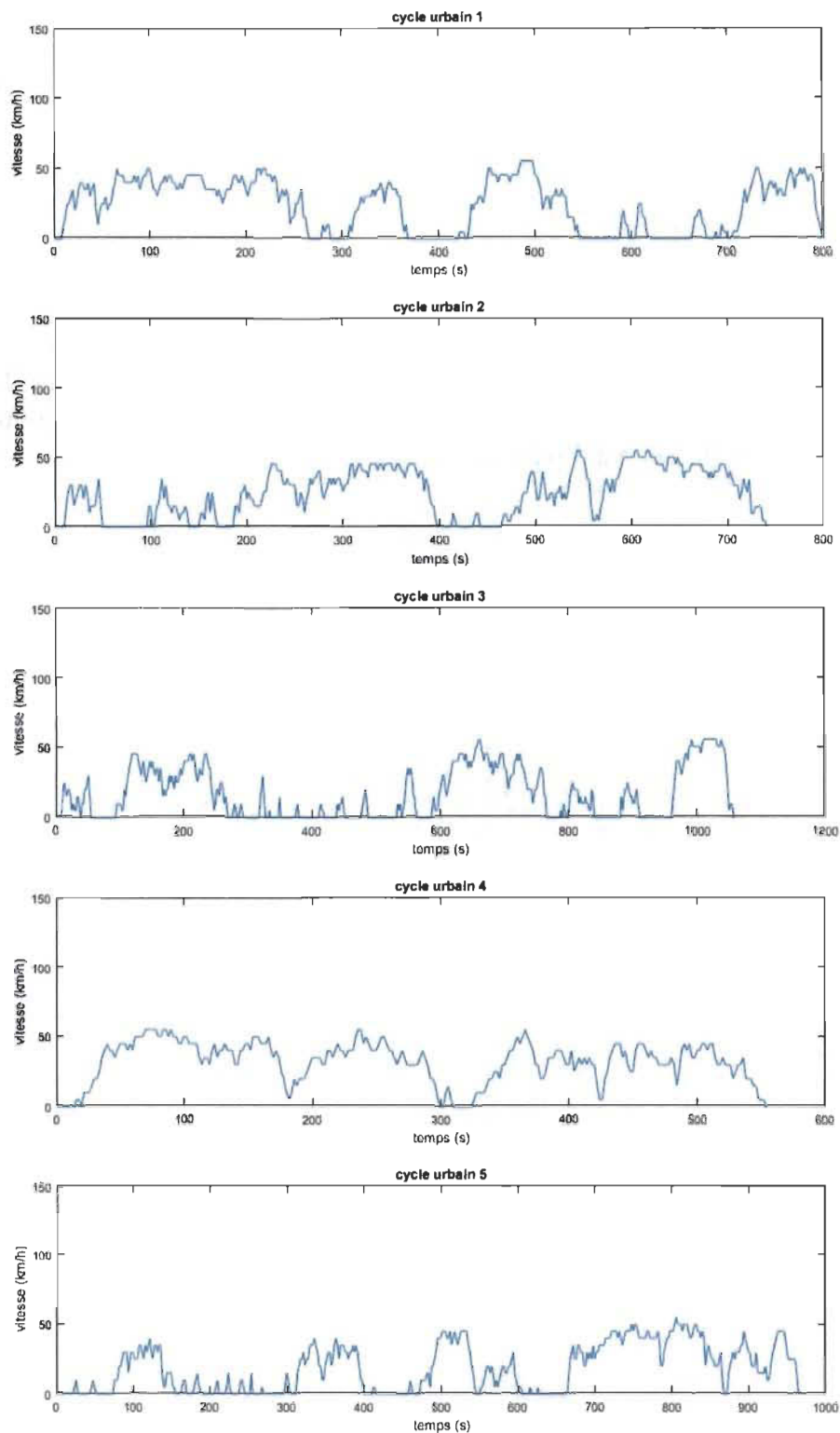


FIGURE D.1 – Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - urbain 1-5



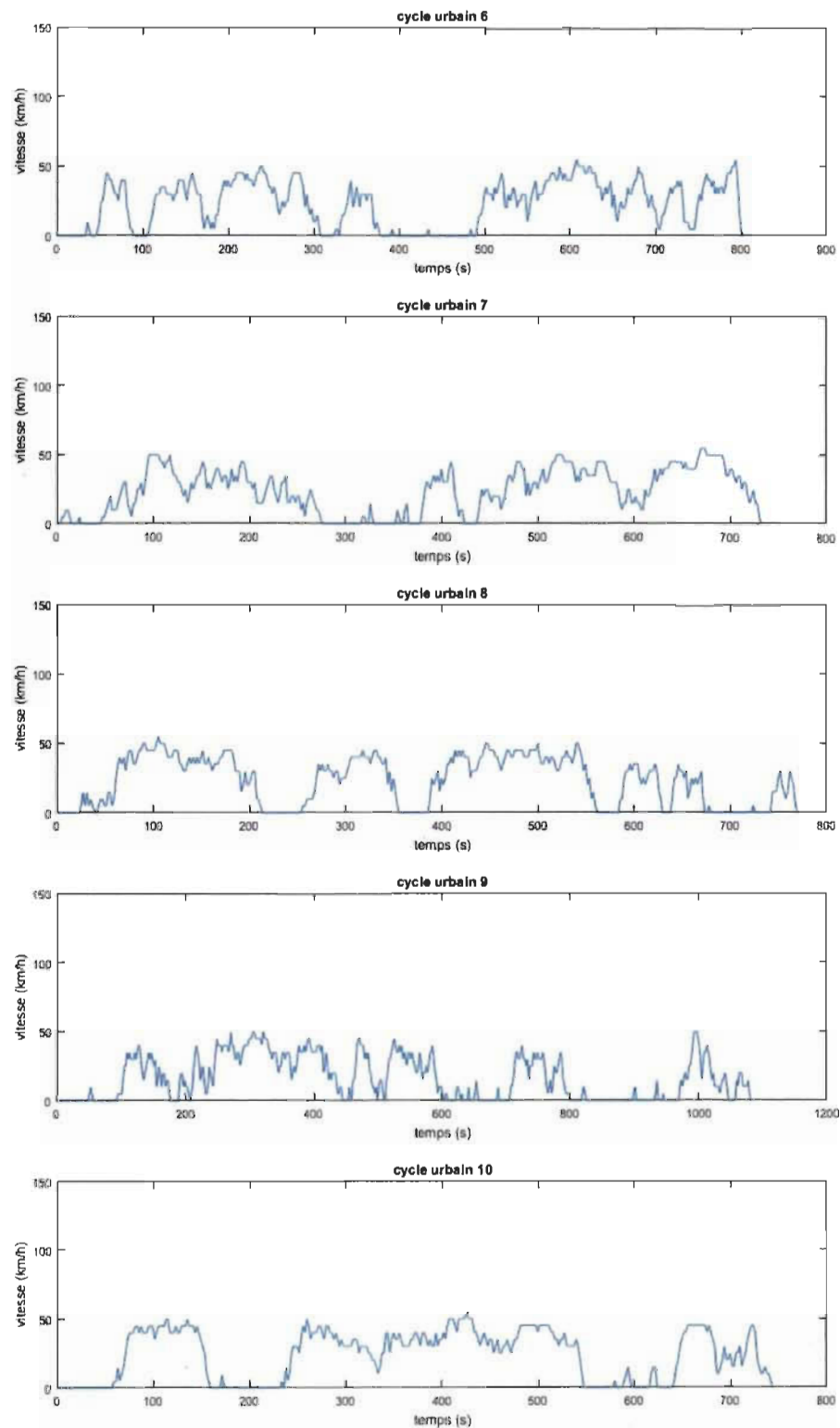


FIGURE D.2 – Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - urbain 6-10

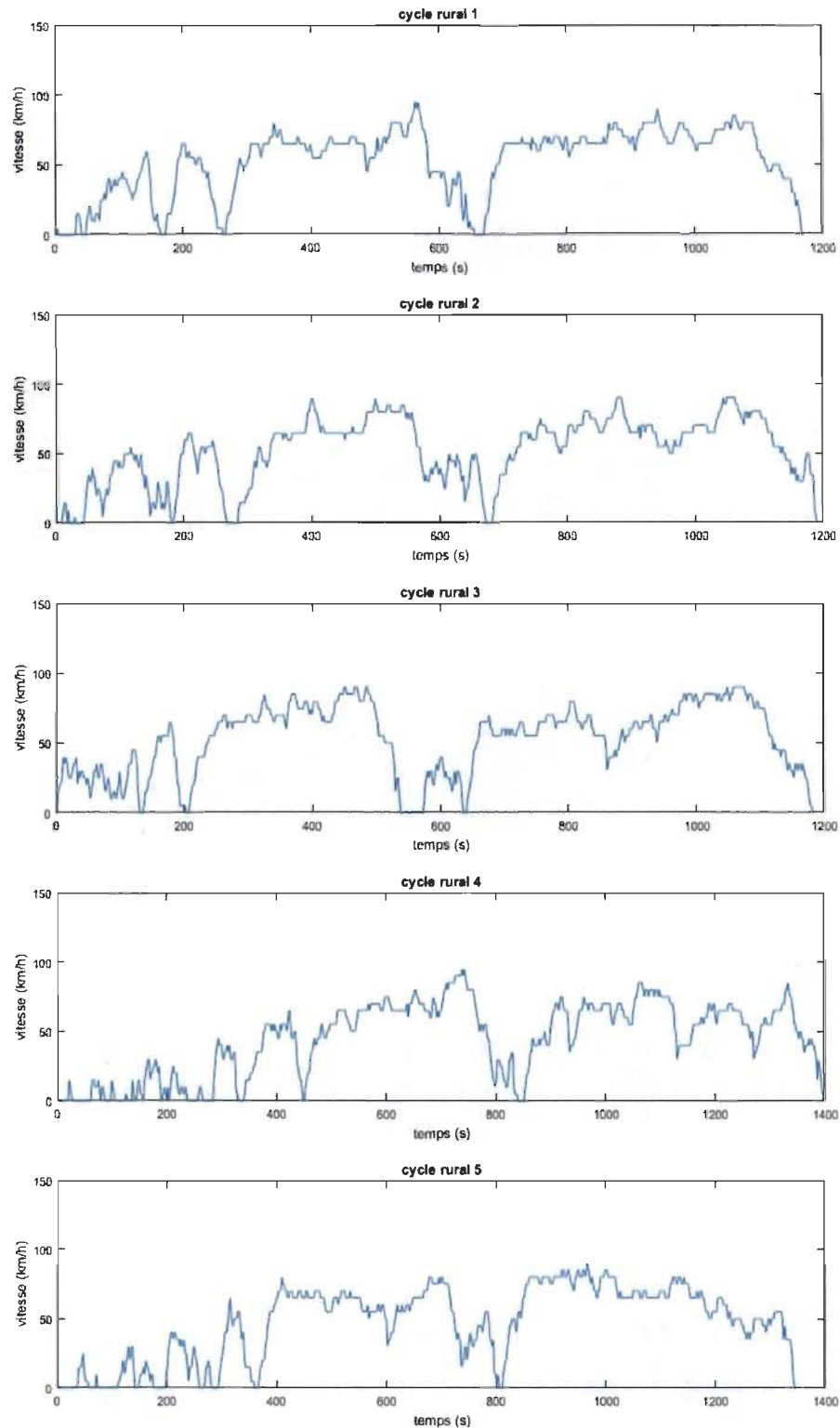


FIGURE D.3 – Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - rural 1-5

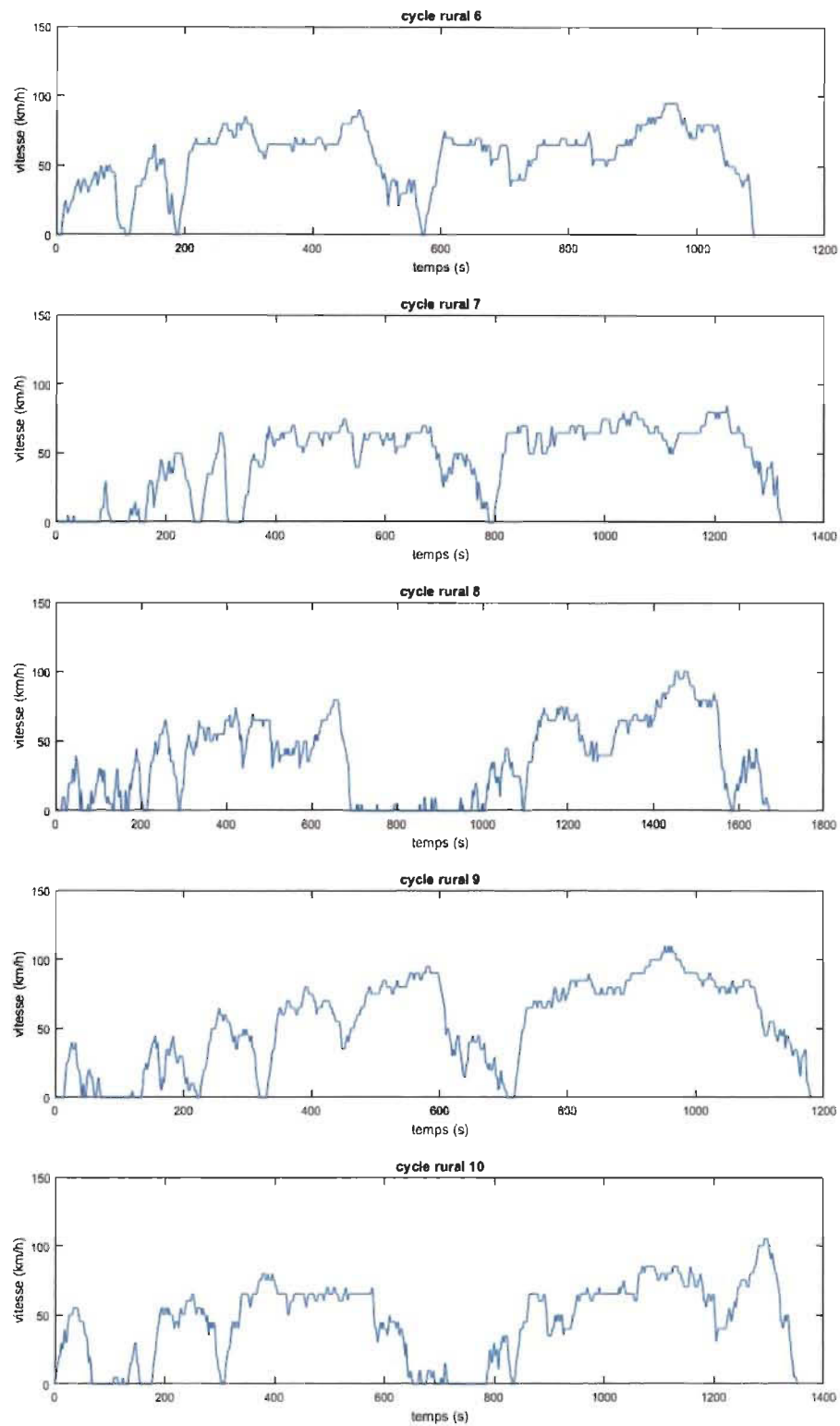


FIGURE D.4 – Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - rural 6-10

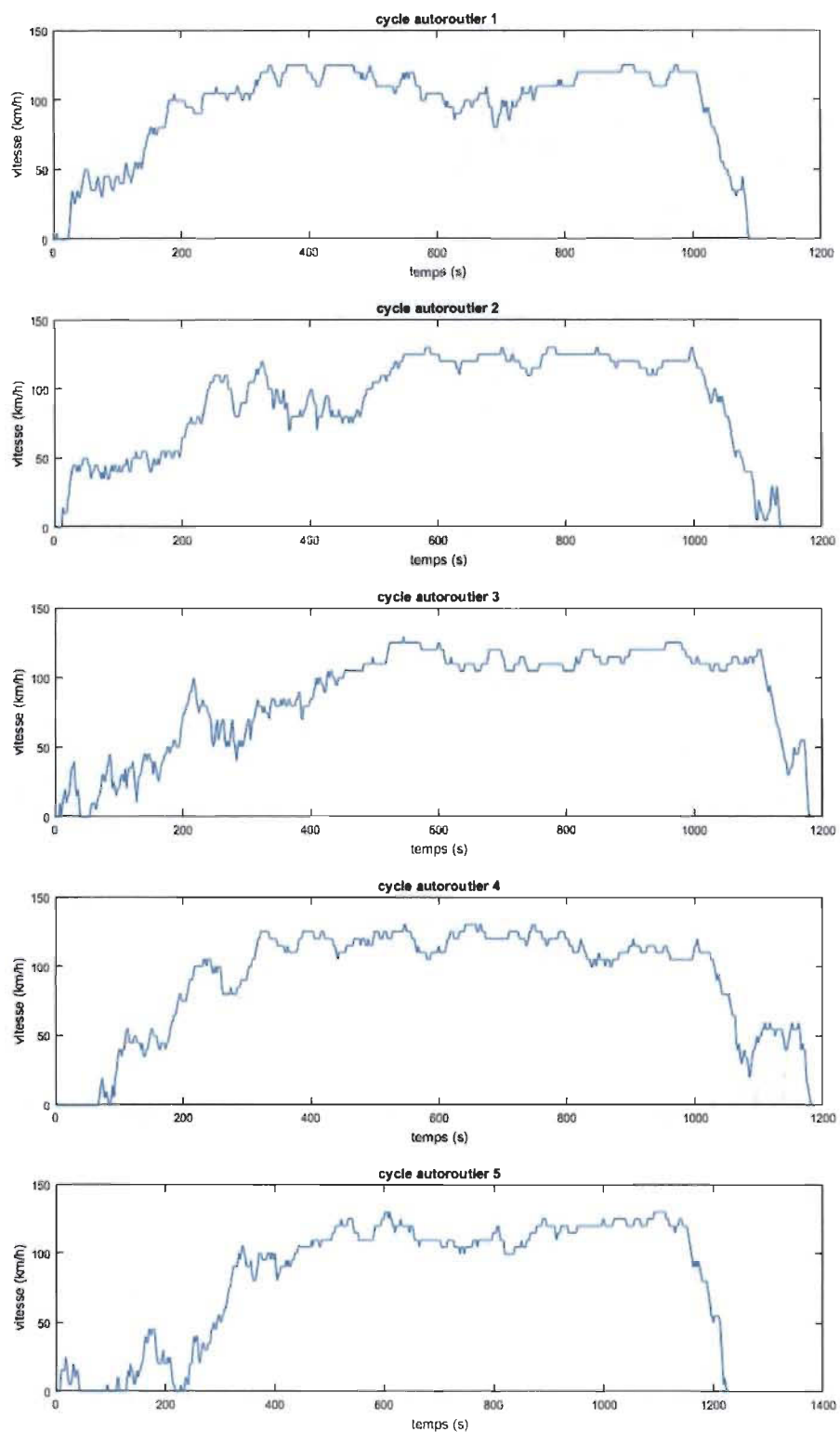


FIGURE D.5 – Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - autoroutier 1-5

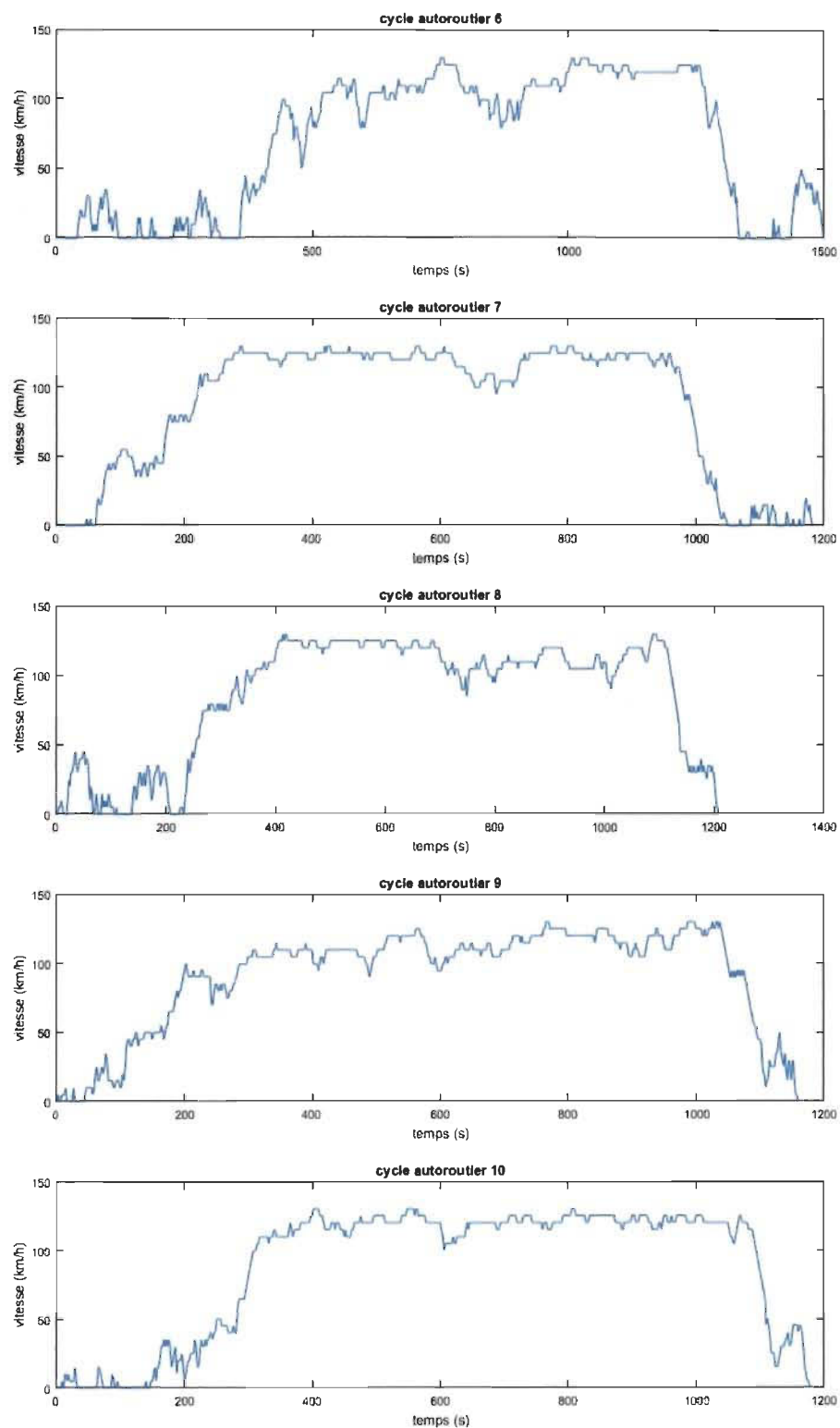


FIGURE D.6 – Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - autoroutier 6-10

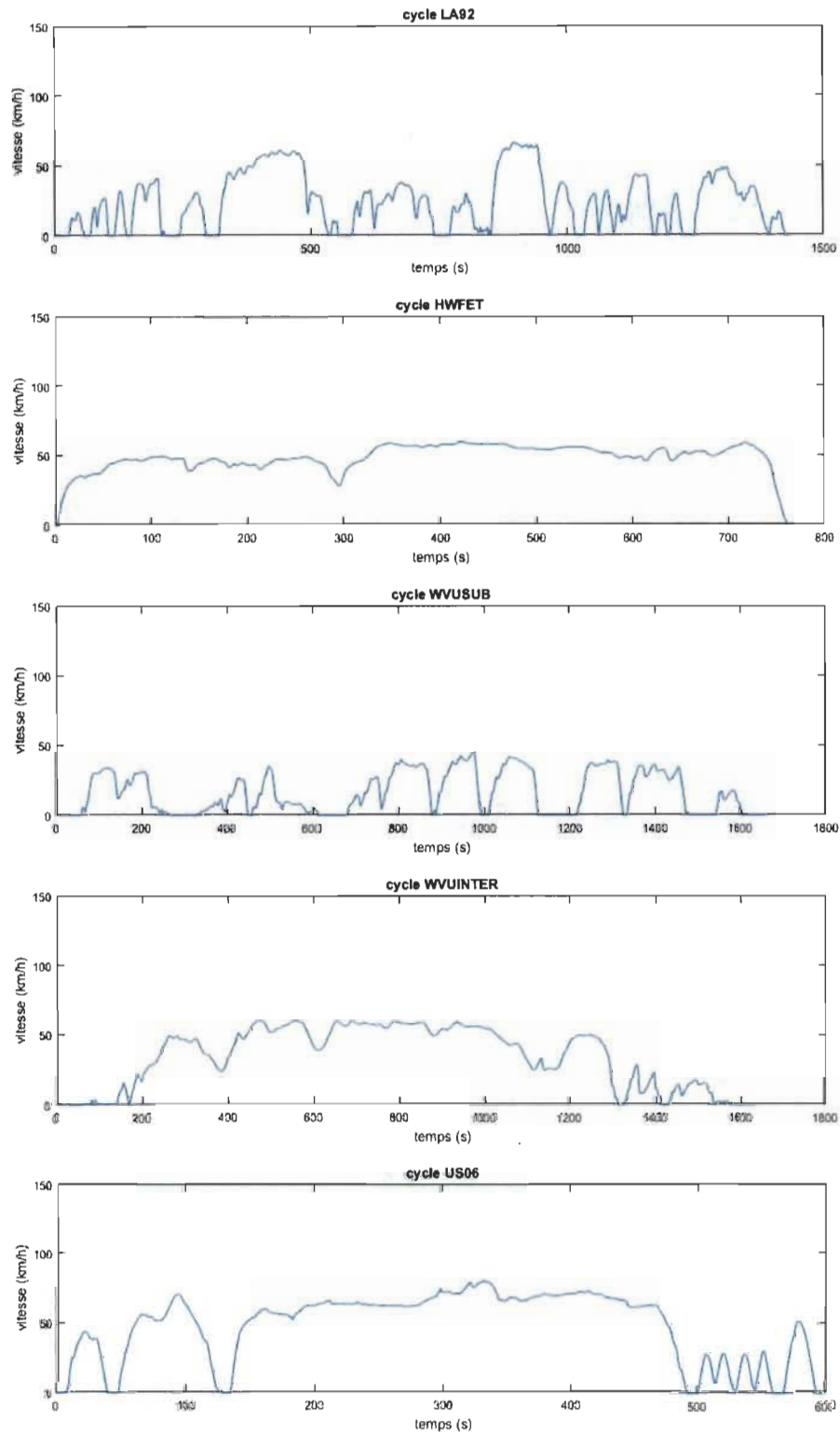


FIGURE D.7 – Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - inconnu 1-5

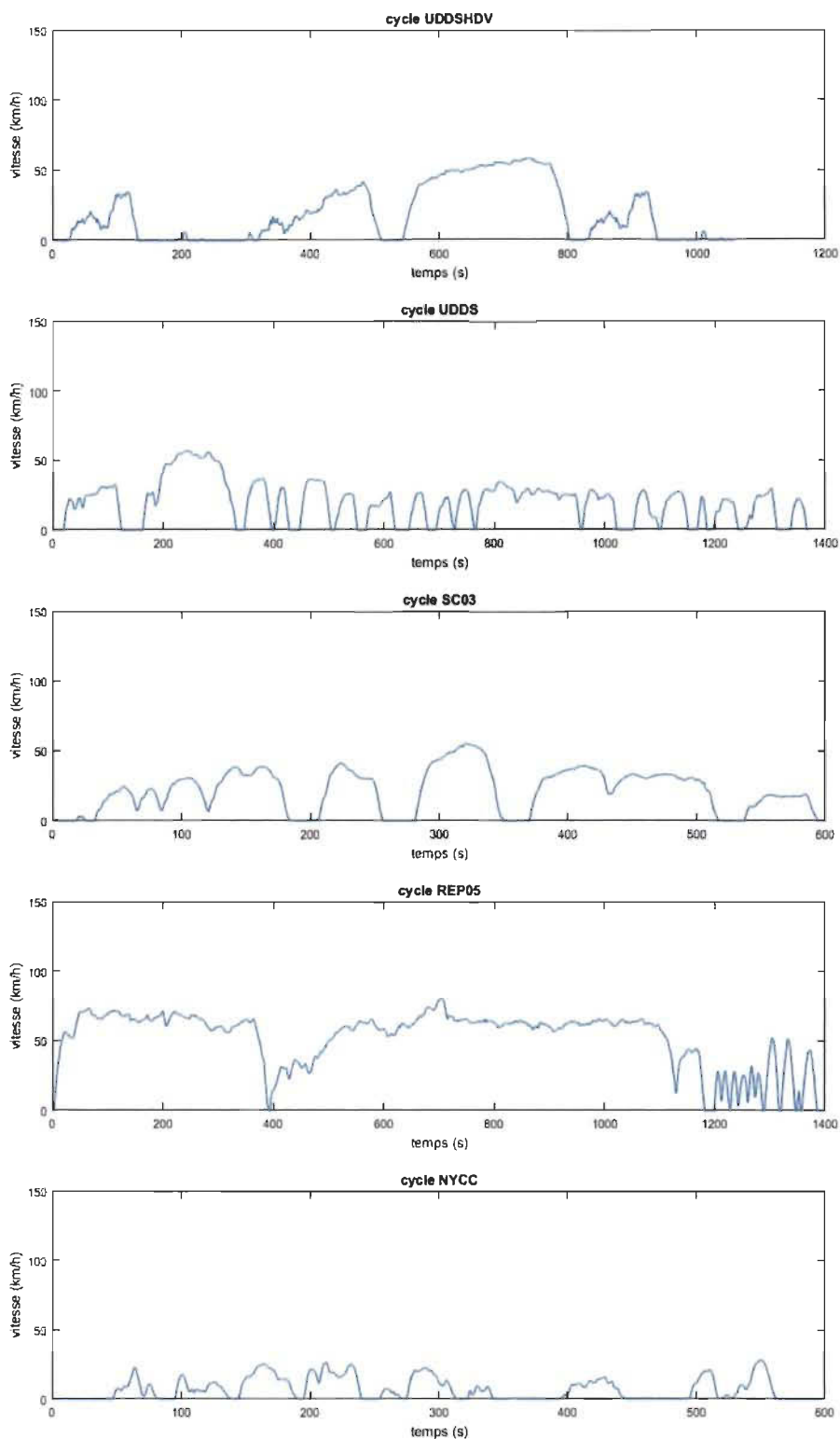


FIGURE D.8 – Cycles de conduite utilisés pour l'évaluation de la stratégie de gestion énergétique - inconnu 6-10





## COMPORTEMENT DES GESTIONS ÉNERGÉTIQUES EN LIGNE

Le coût d'exploitation et ses composantes, la masse d'hydrogène consommée, le nombre de systèmes PAC démarrés, le temps d'utilisation et la dégradation de la batterie sont présentés dans cette annexe pour tous les cas étudiés. La légende utilisée dans les figures suivantes impose le trait plein pour la stratégie bayésienne, le trait pointillé long pour la stratégie basée sur les règles et le trait pointillé court pour la stratégie par filtrage.

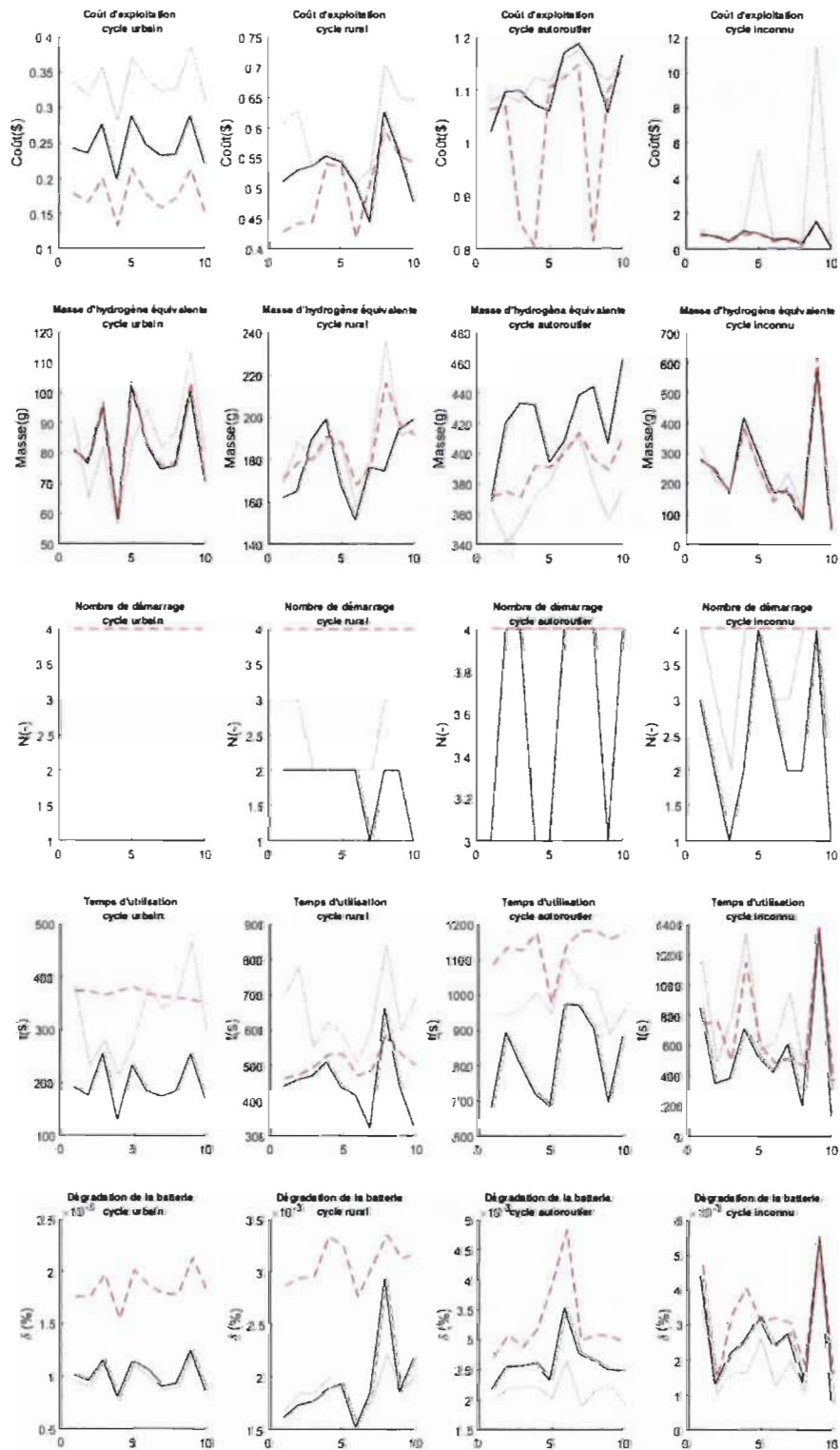


FIGURE E.1 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 40%

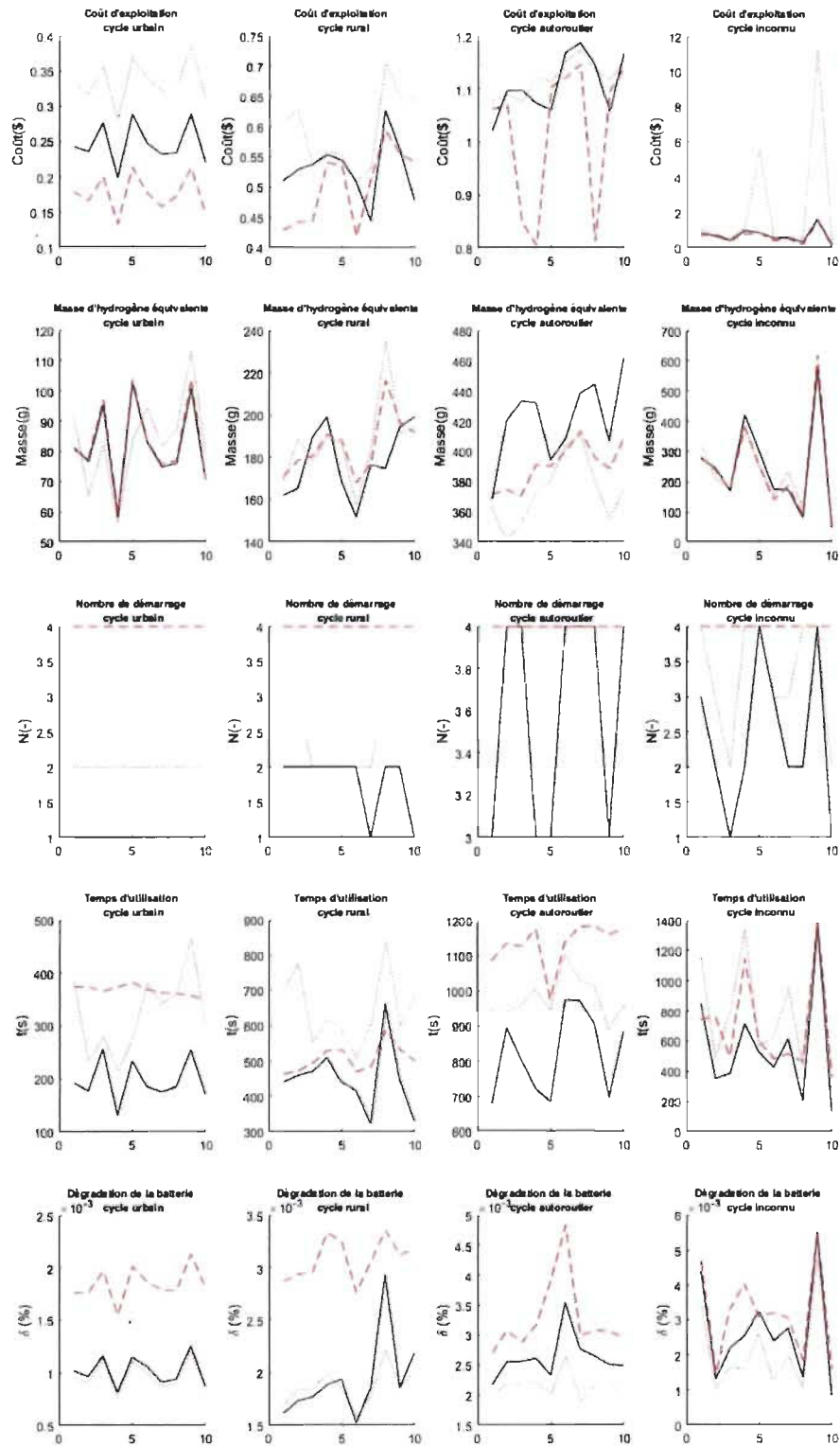


FIGURE E.2 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 41%

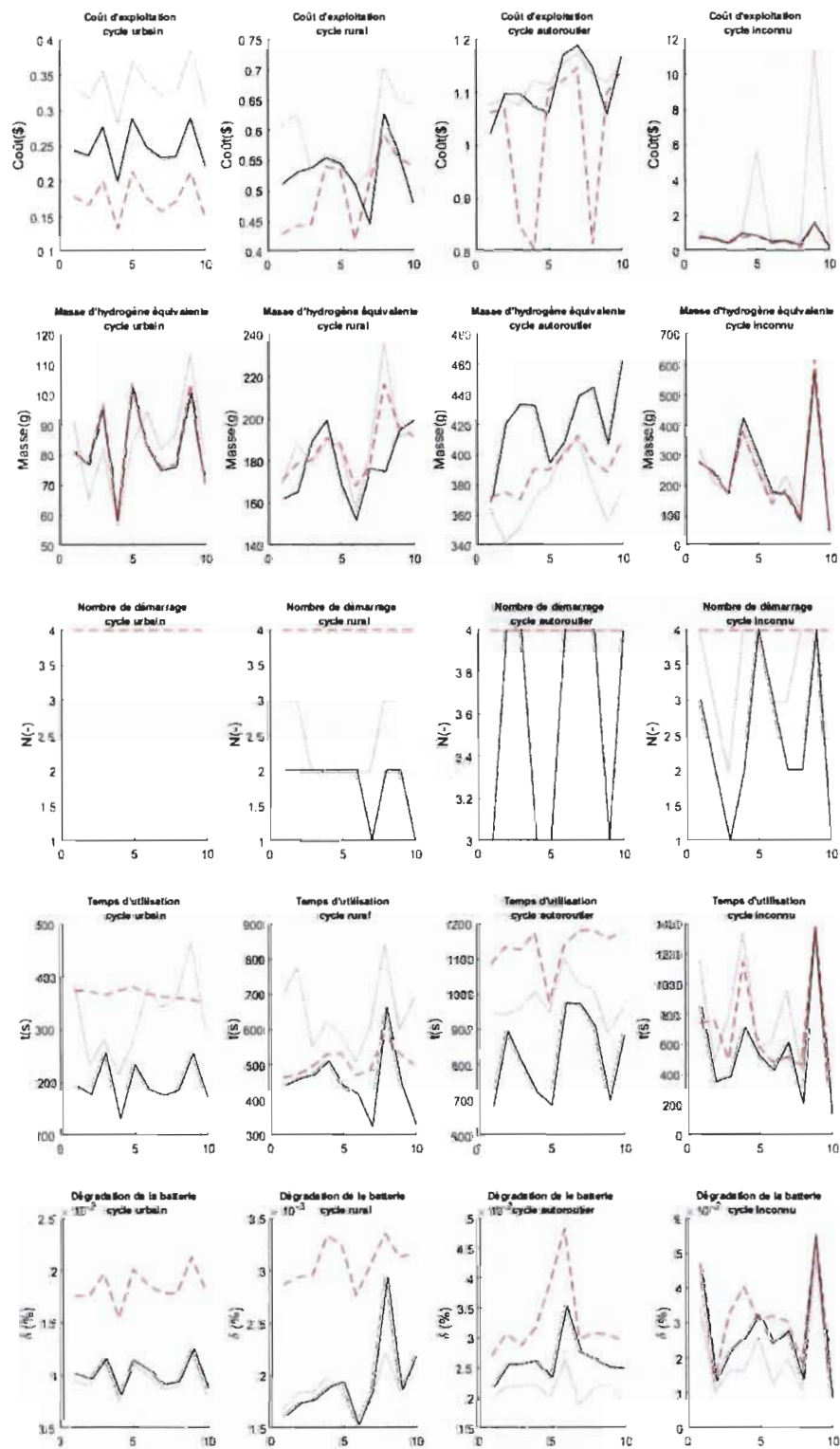


FIGURE E.3 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 42%

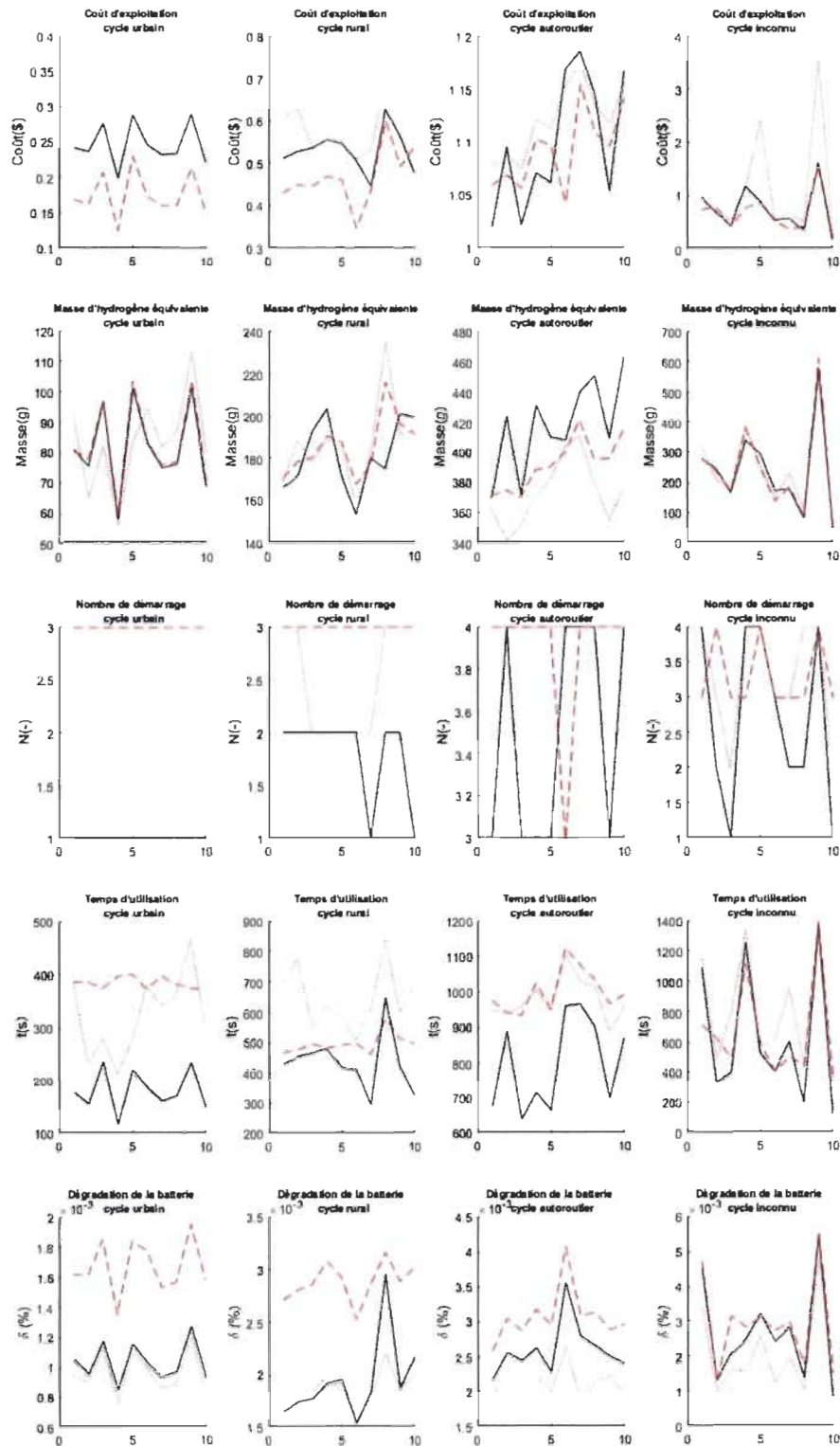


FIGURE E.4 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 43%

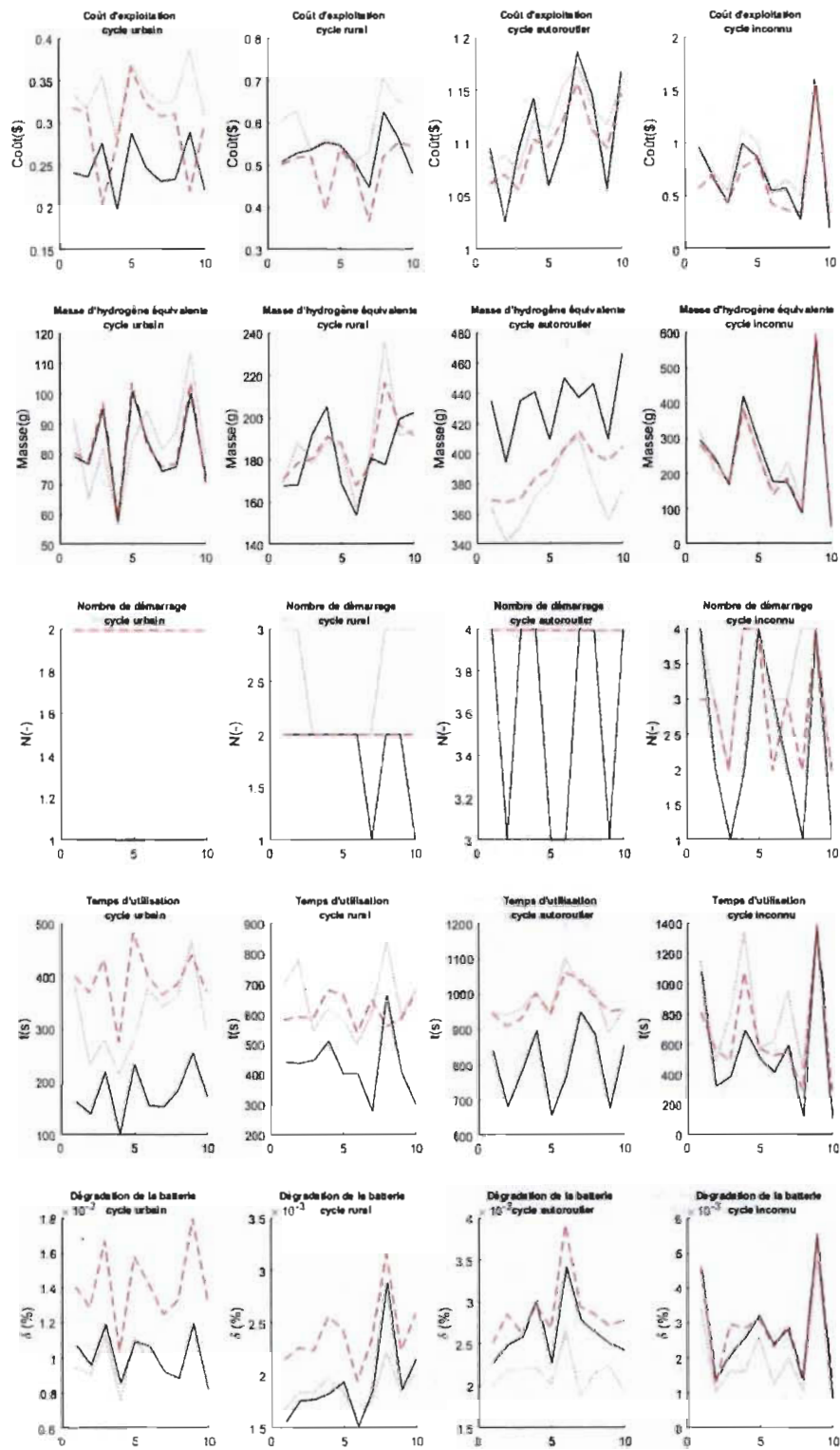


FIGURE E.5 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 44%



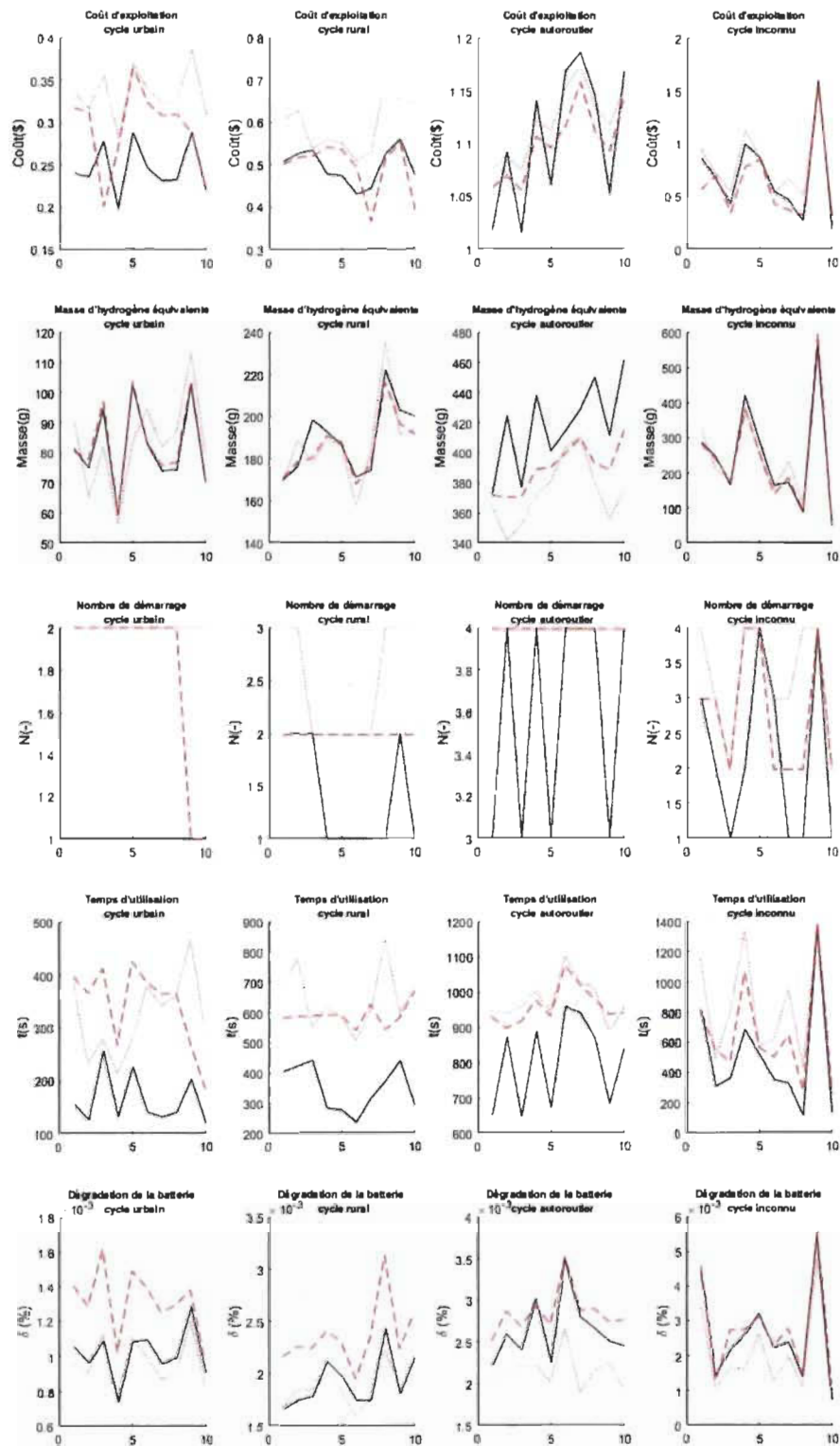


FIGURE E.6 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 45%

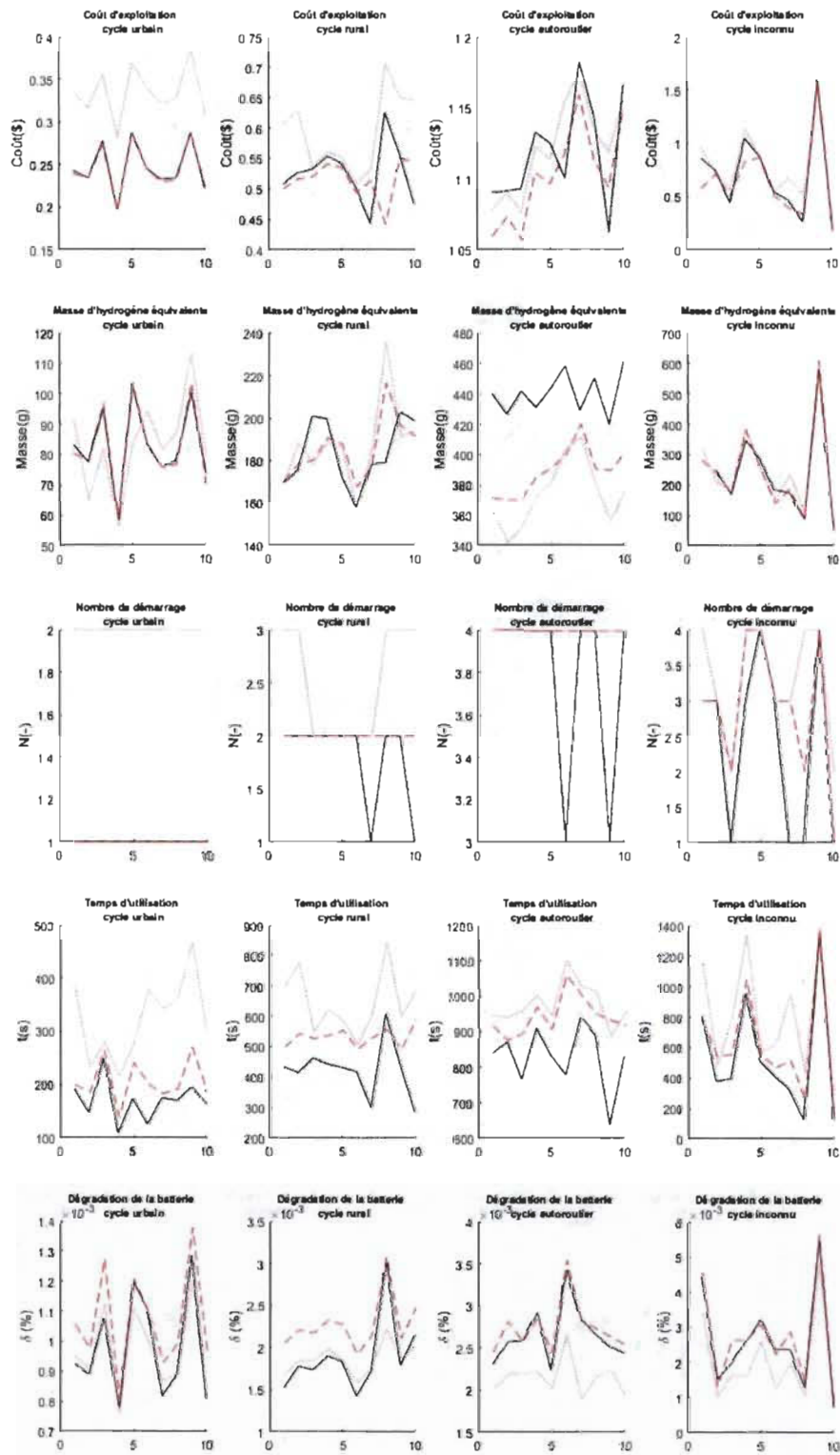


FIGURE E.7 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 46%

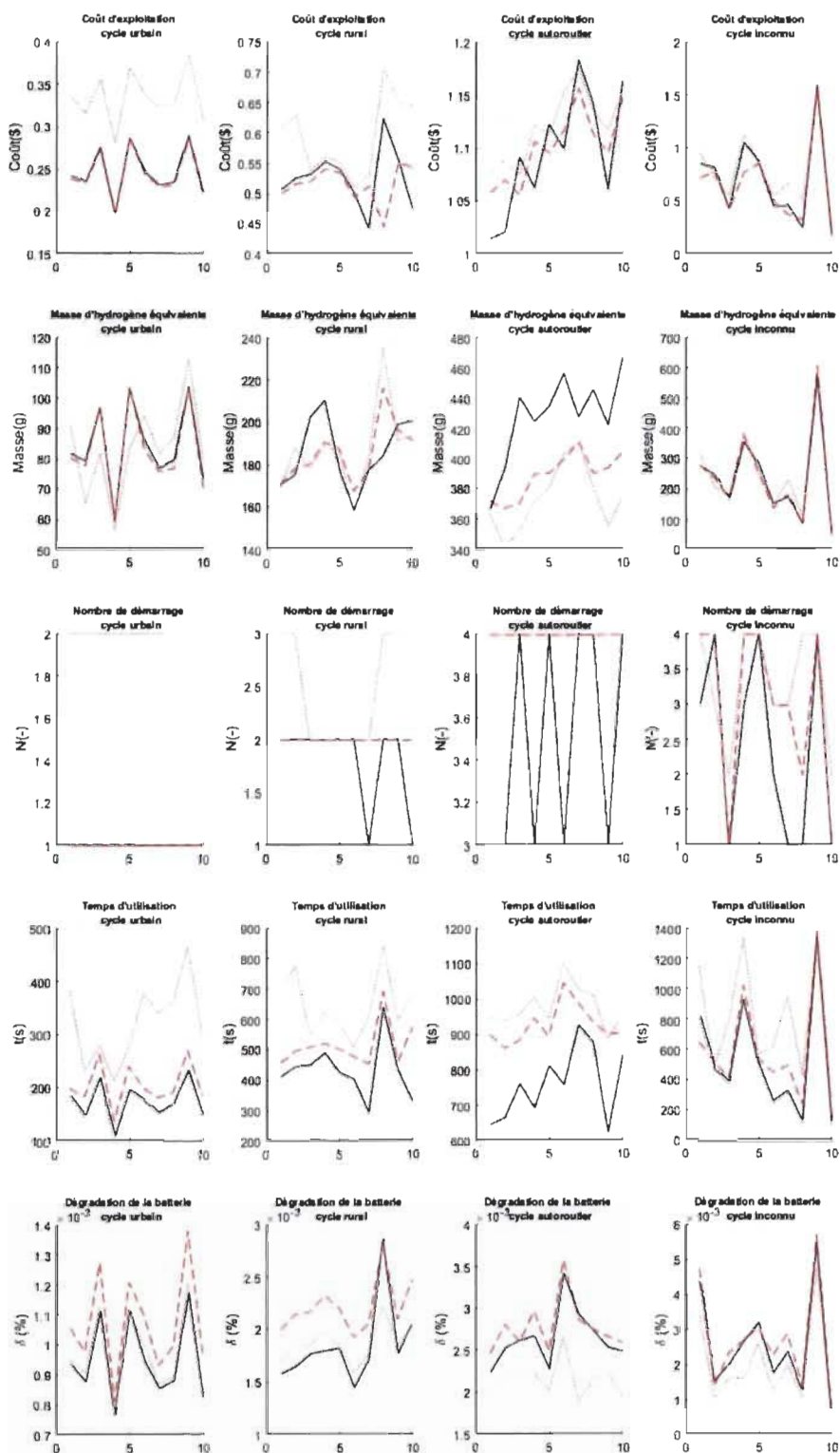


FIGURE E.8 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 47%

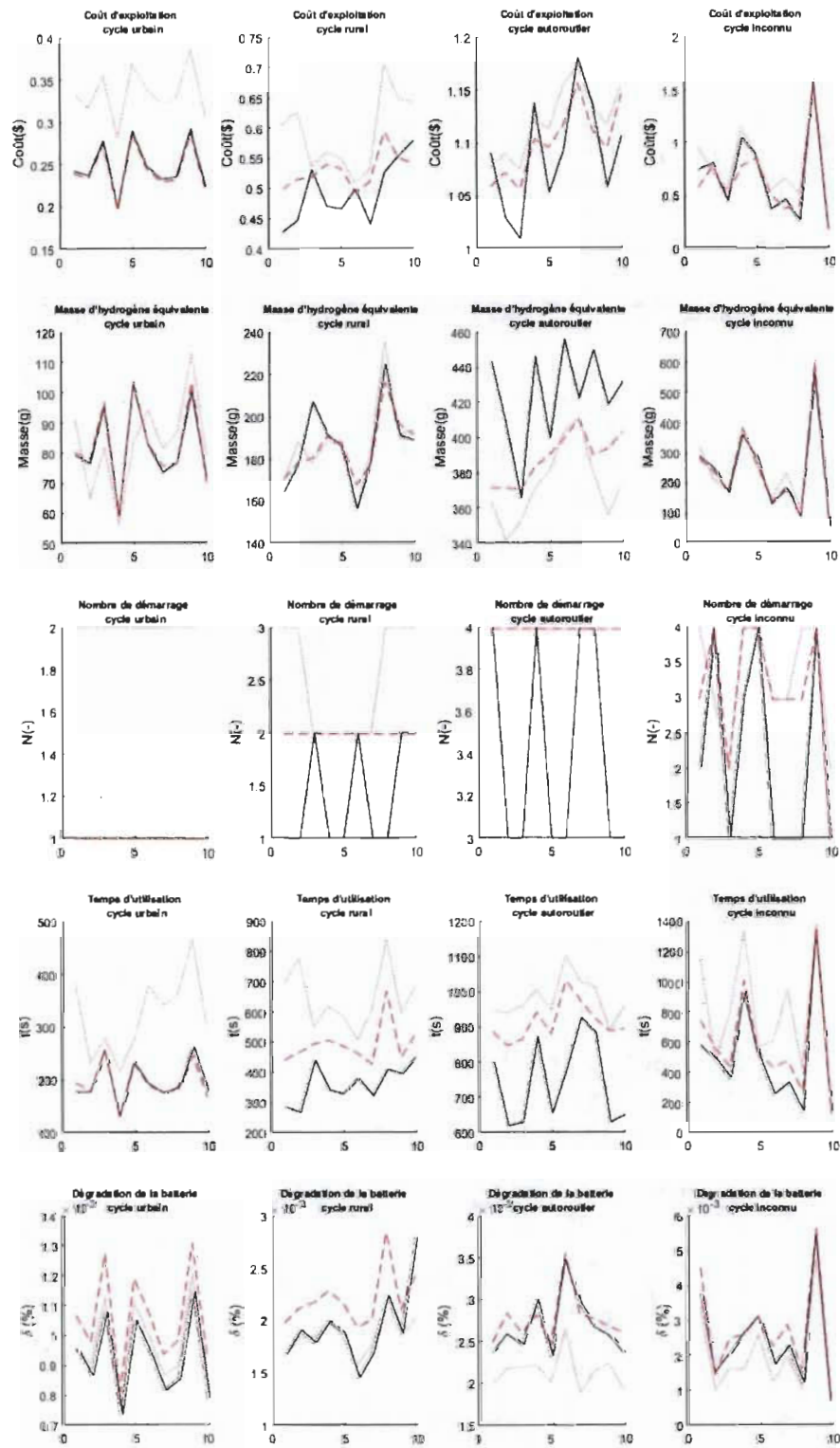


FIGURE E.9 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 48%

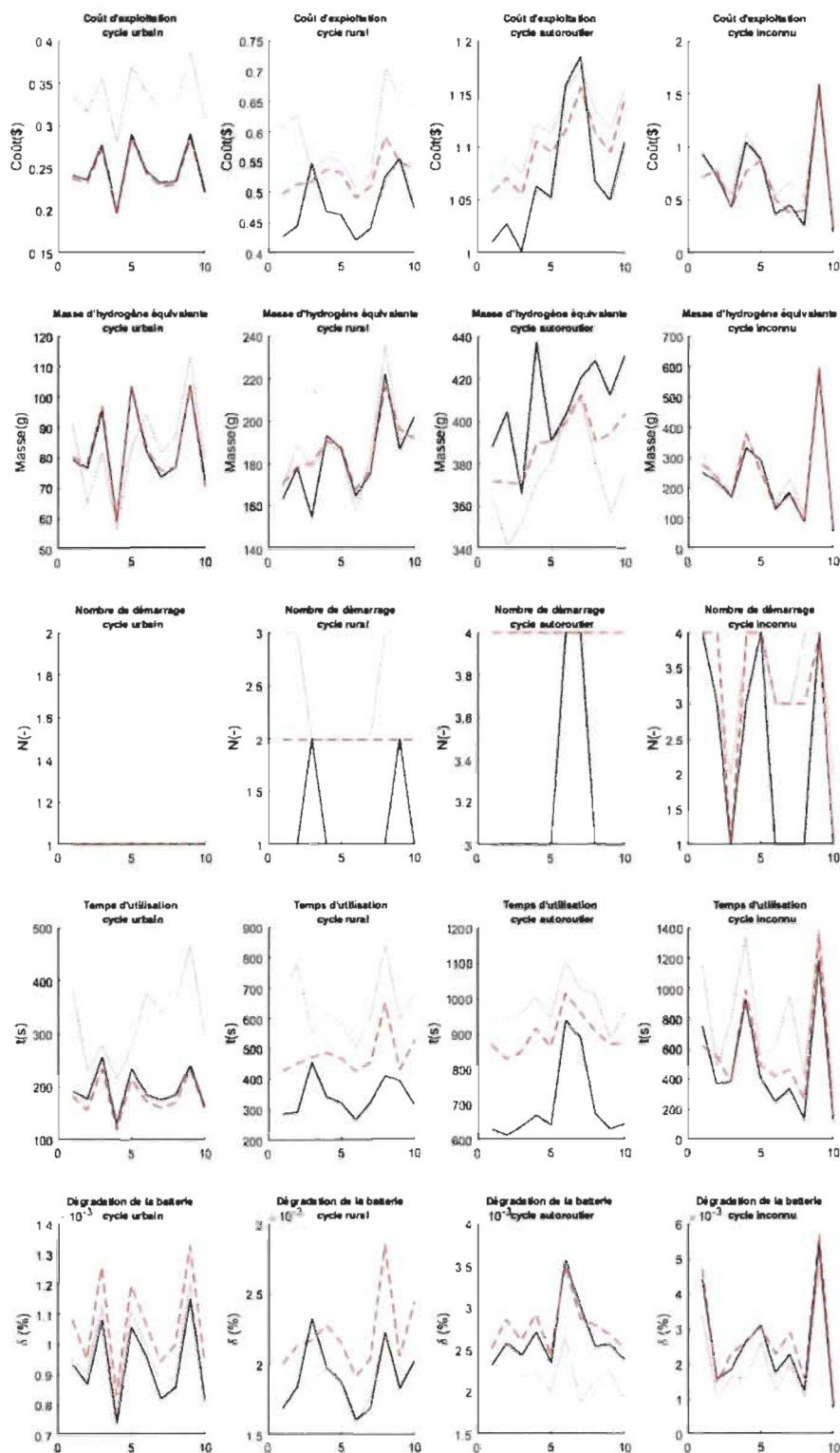


FIGURE E.10 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 49%



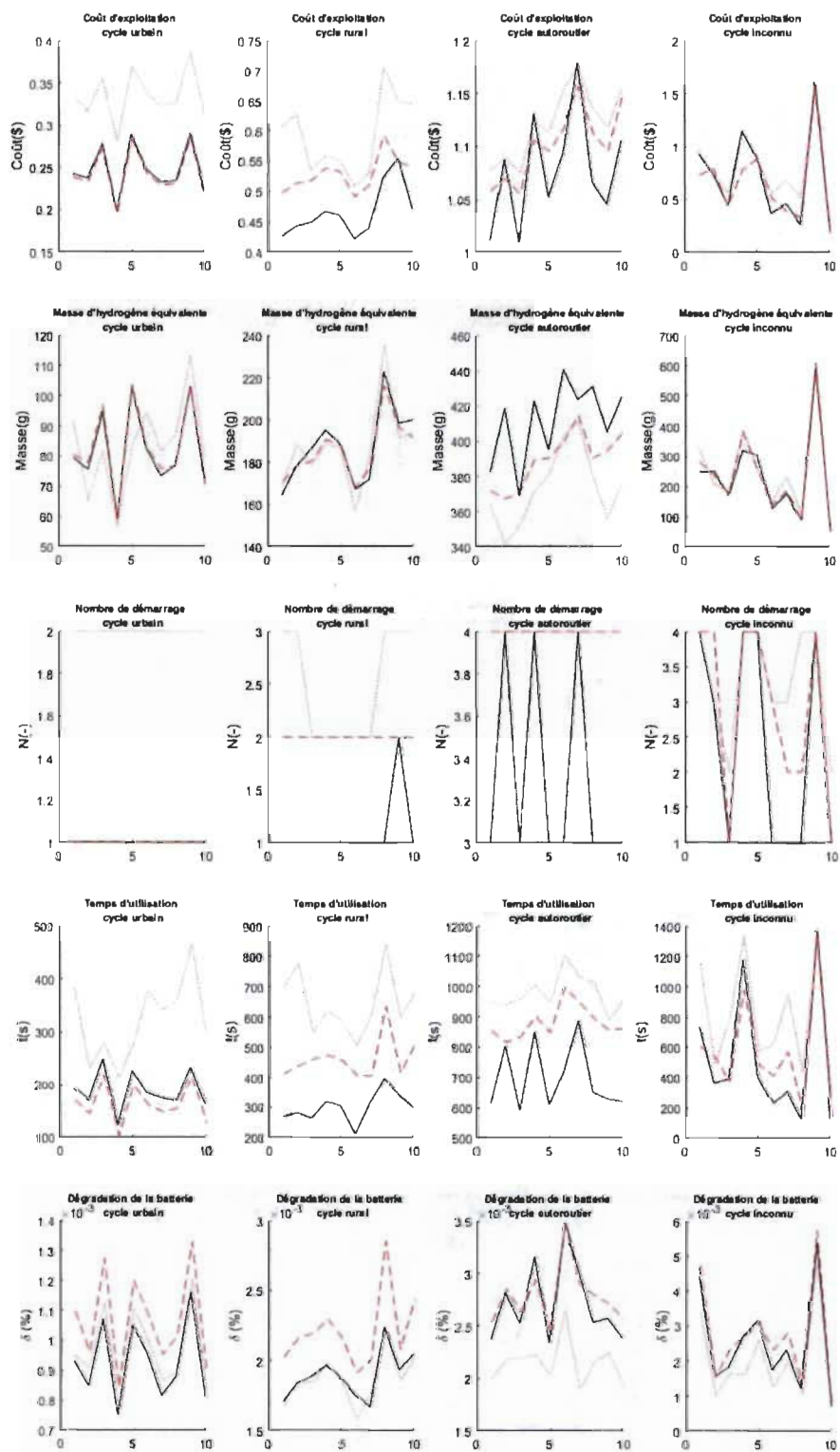


FIGURE E.11 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 50%

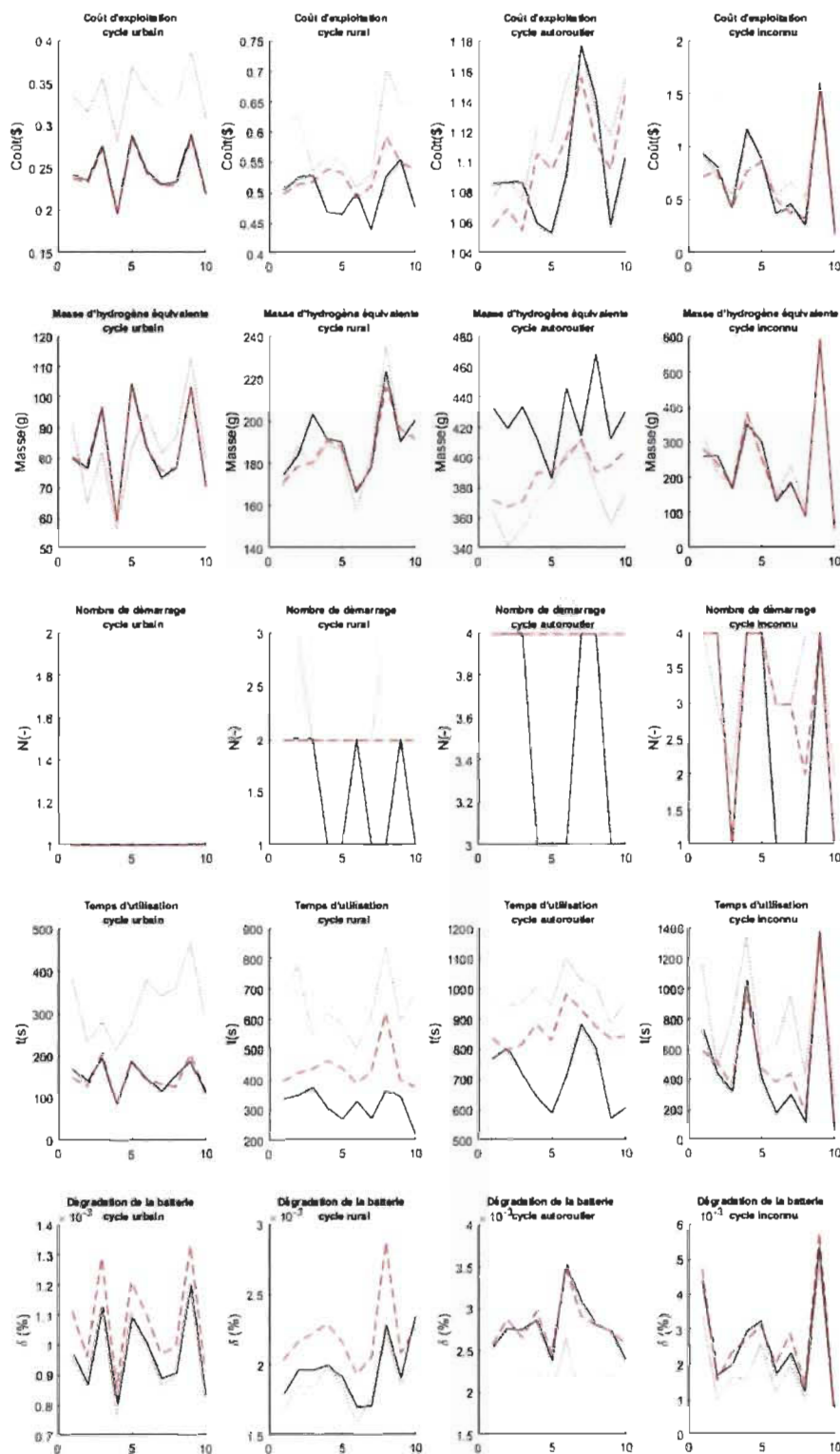


FIGURE E.12 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 51%



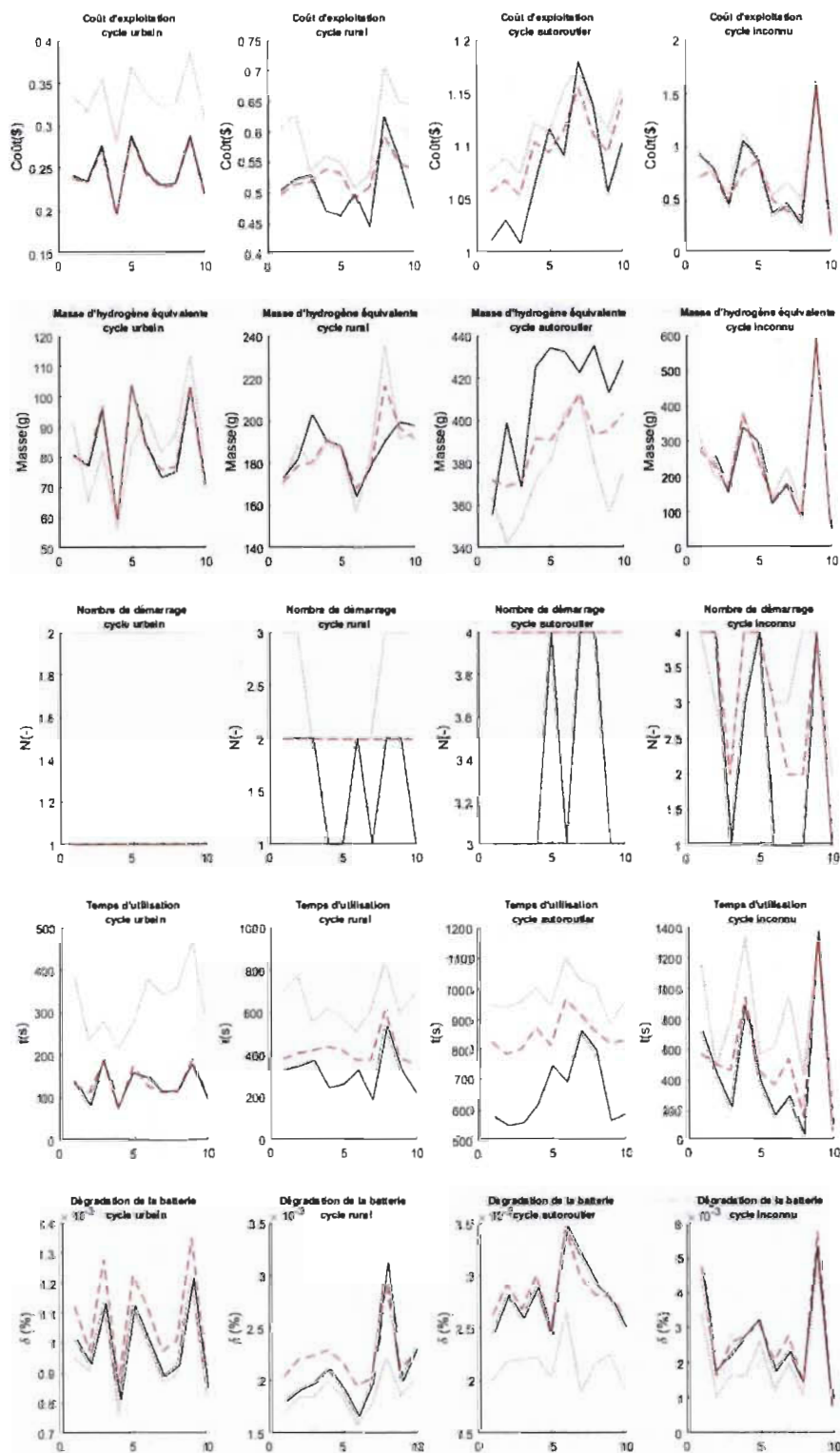


FIGURE E.13 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 52%

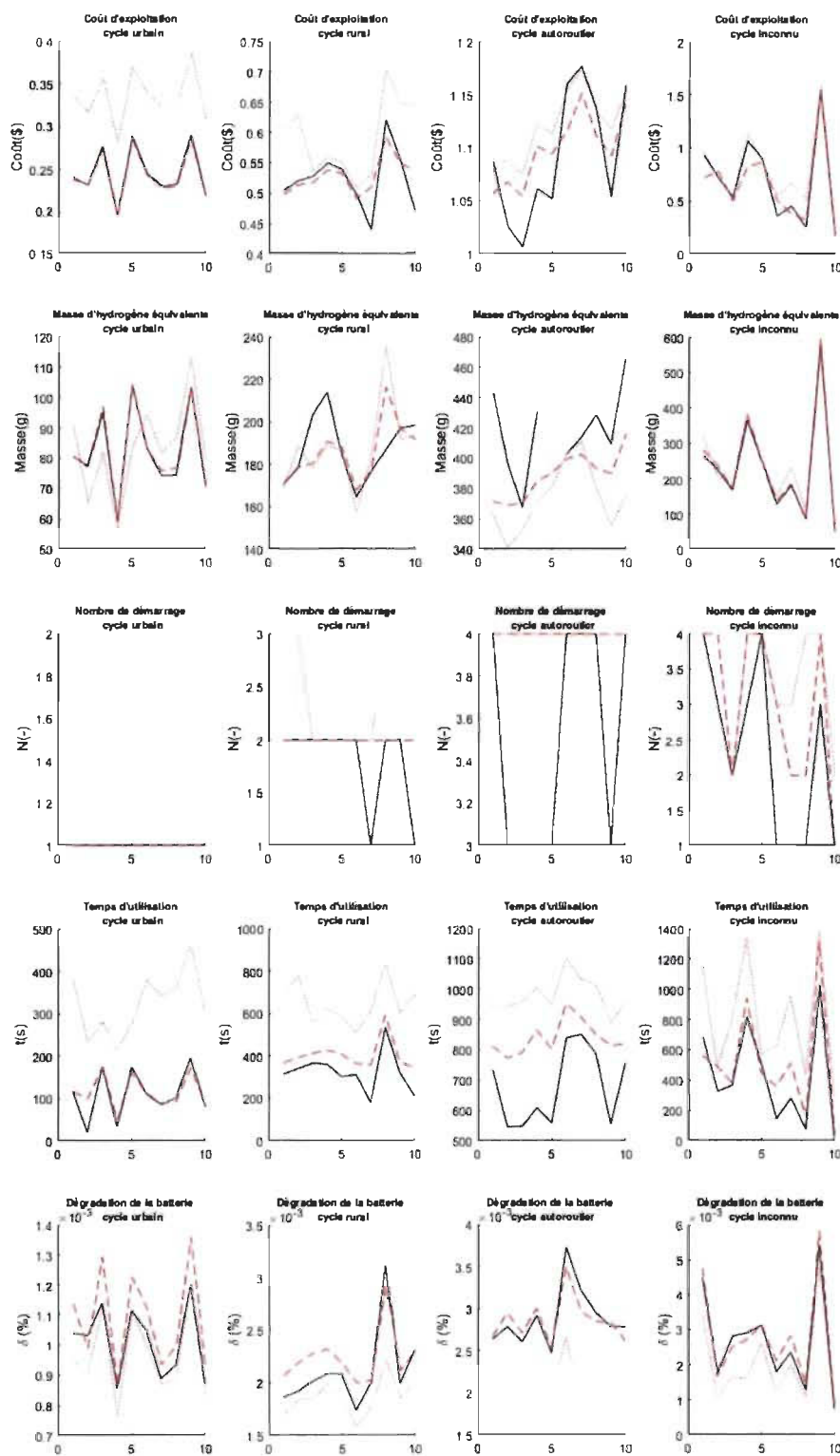


FIGURE E.14 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 53%

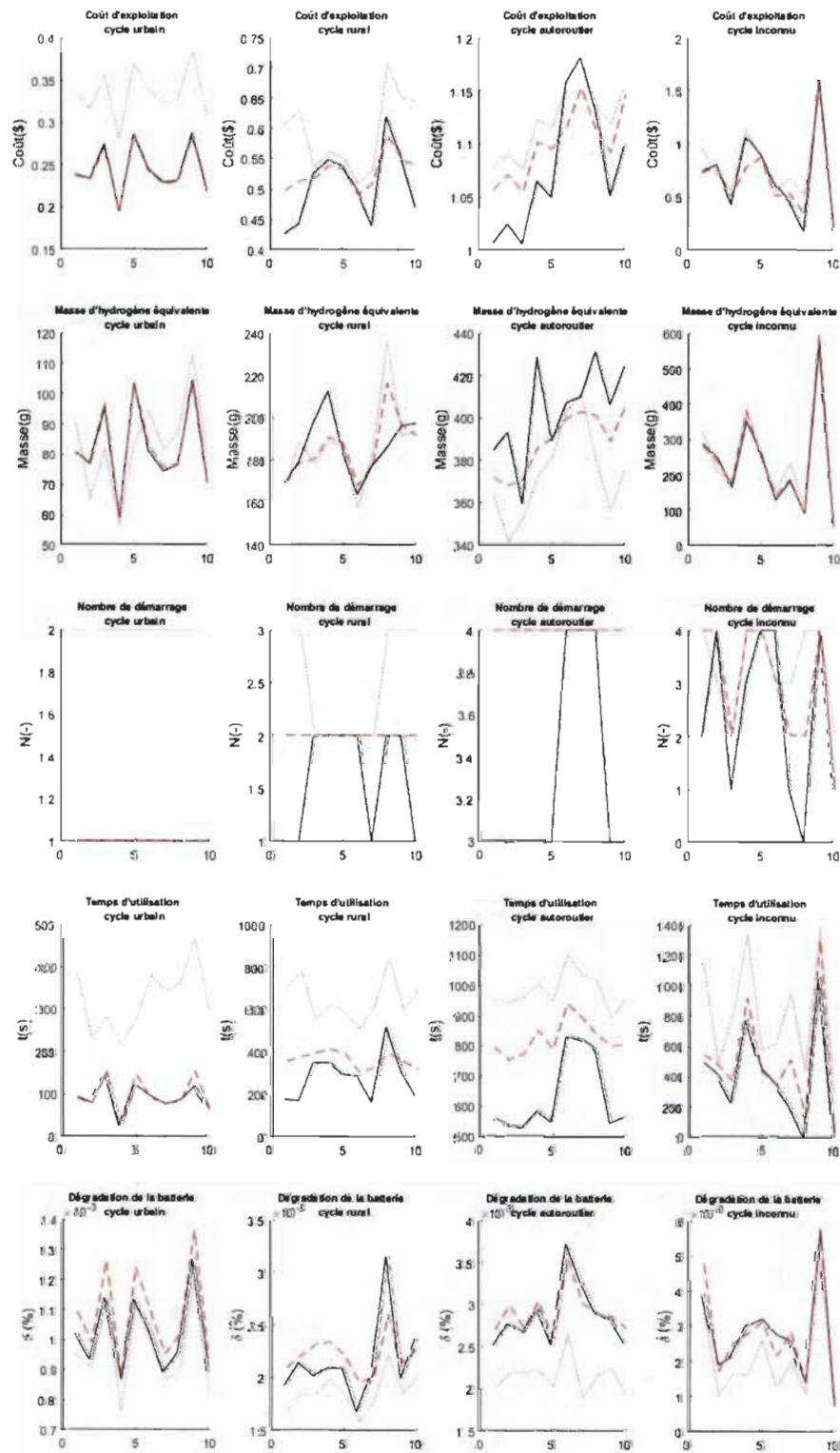


FIGURE E.15 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 54%

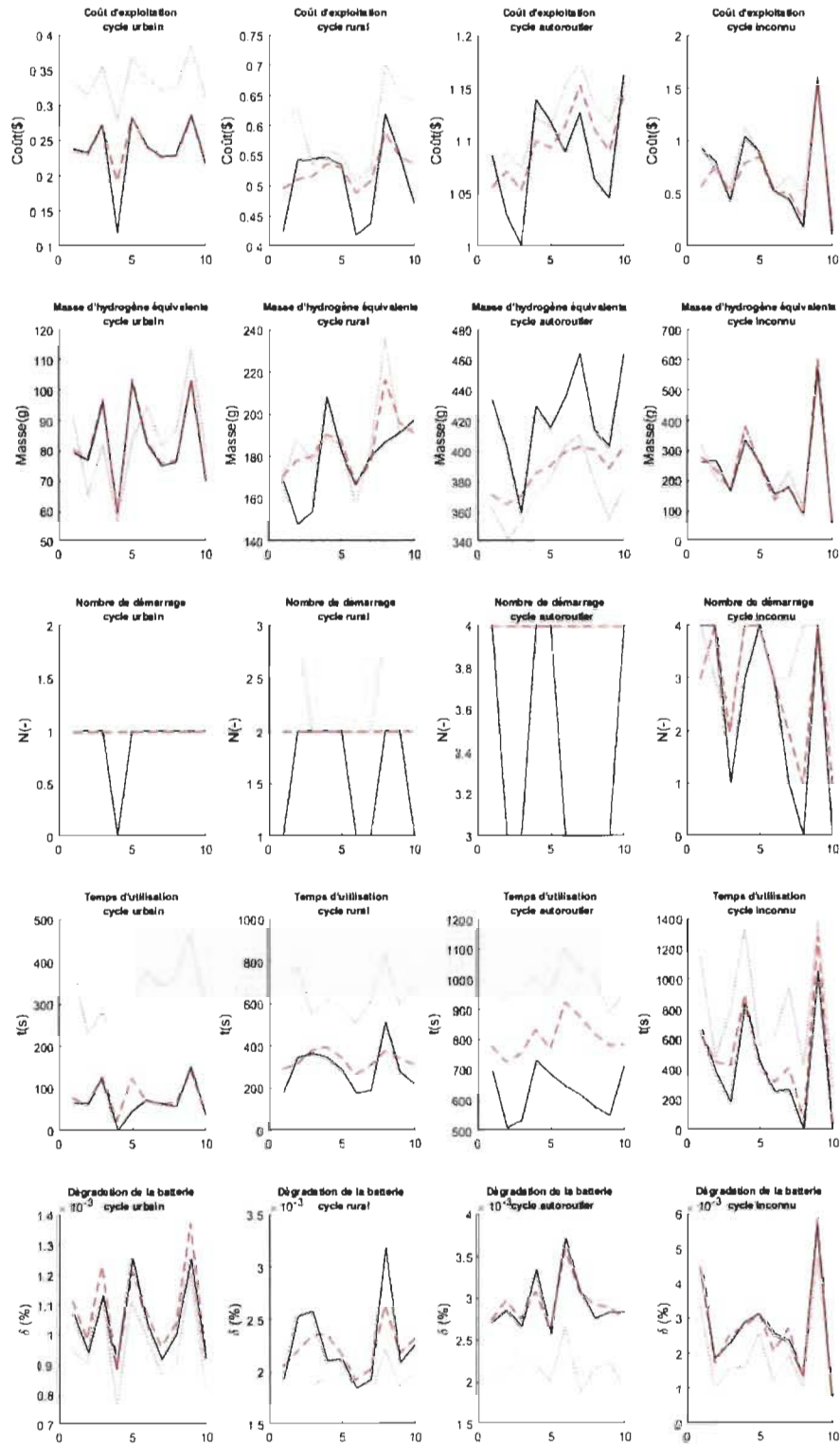


FIGURE E.16 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 55%

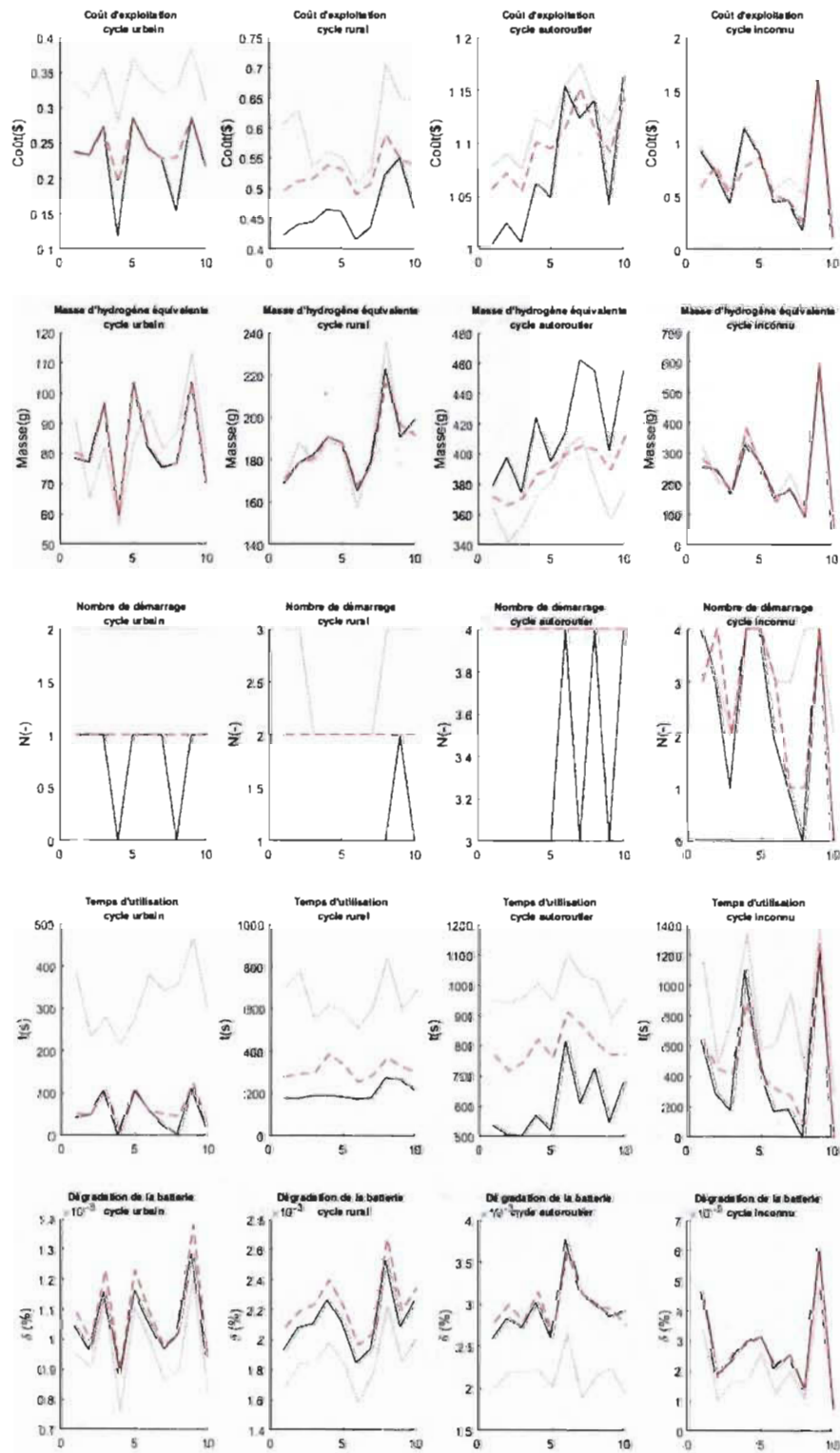


FIGURE E.17 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 56%



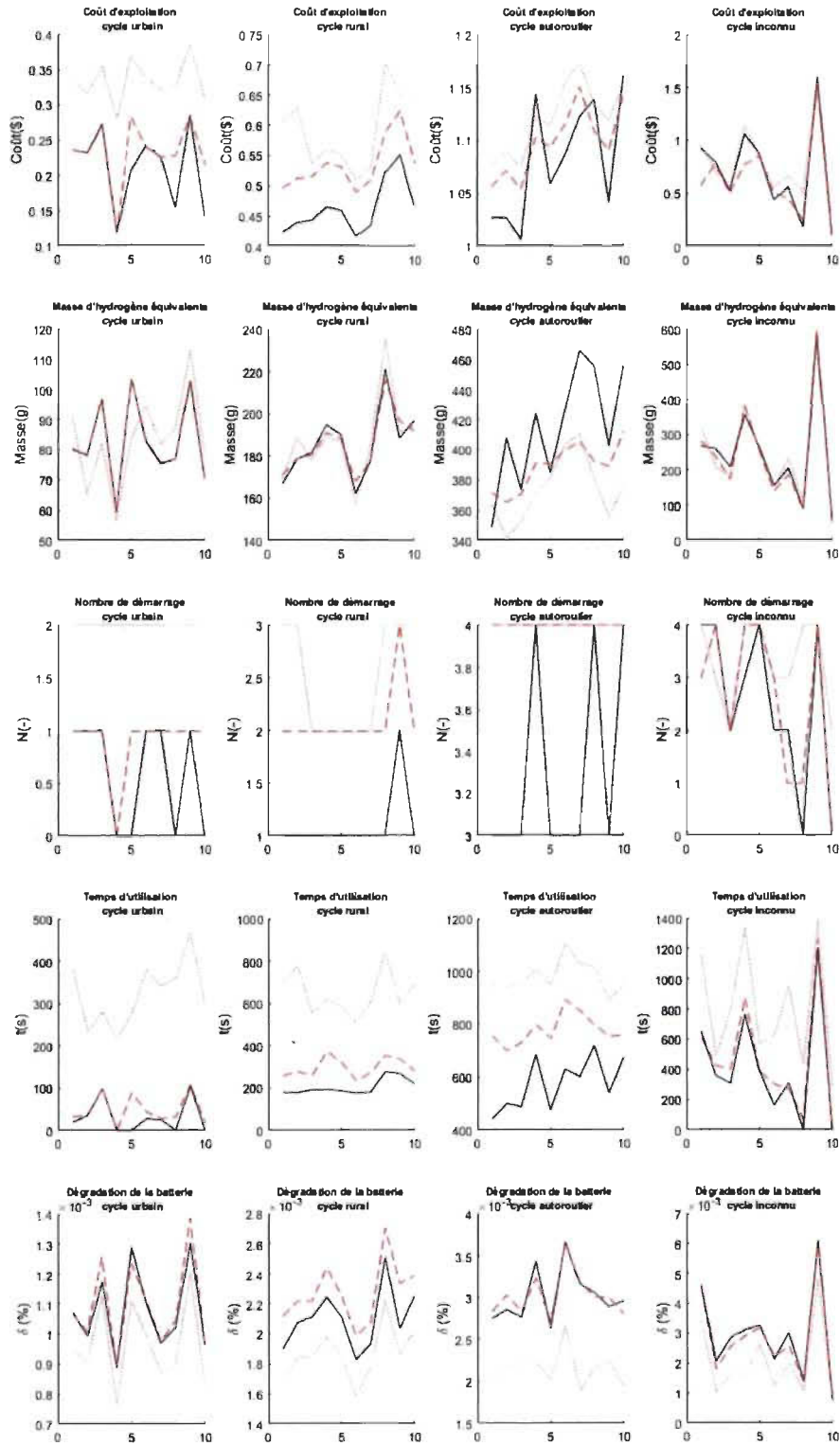


FIGURE E.18 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 57%

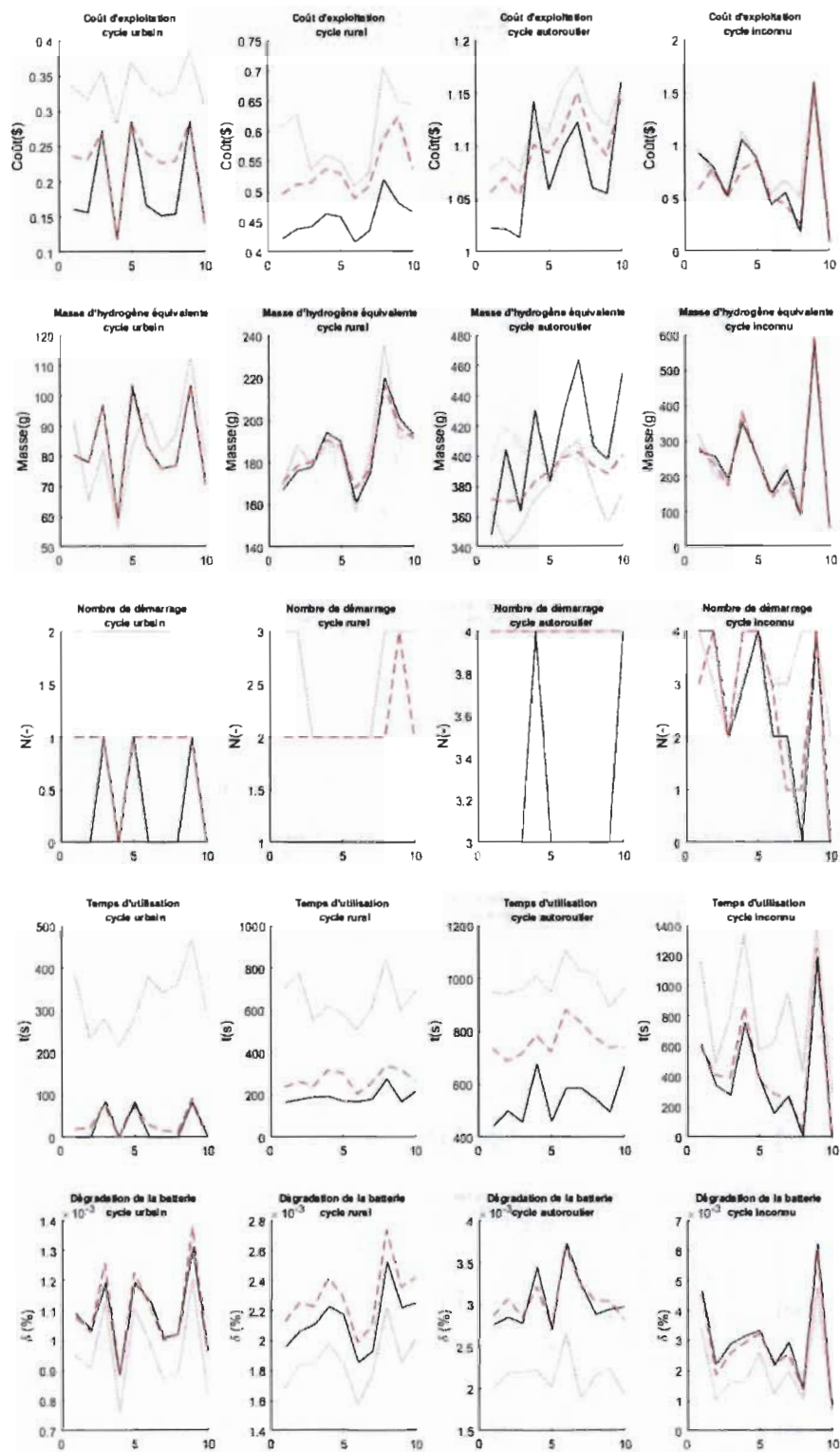


FIGURE E.19 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 58%



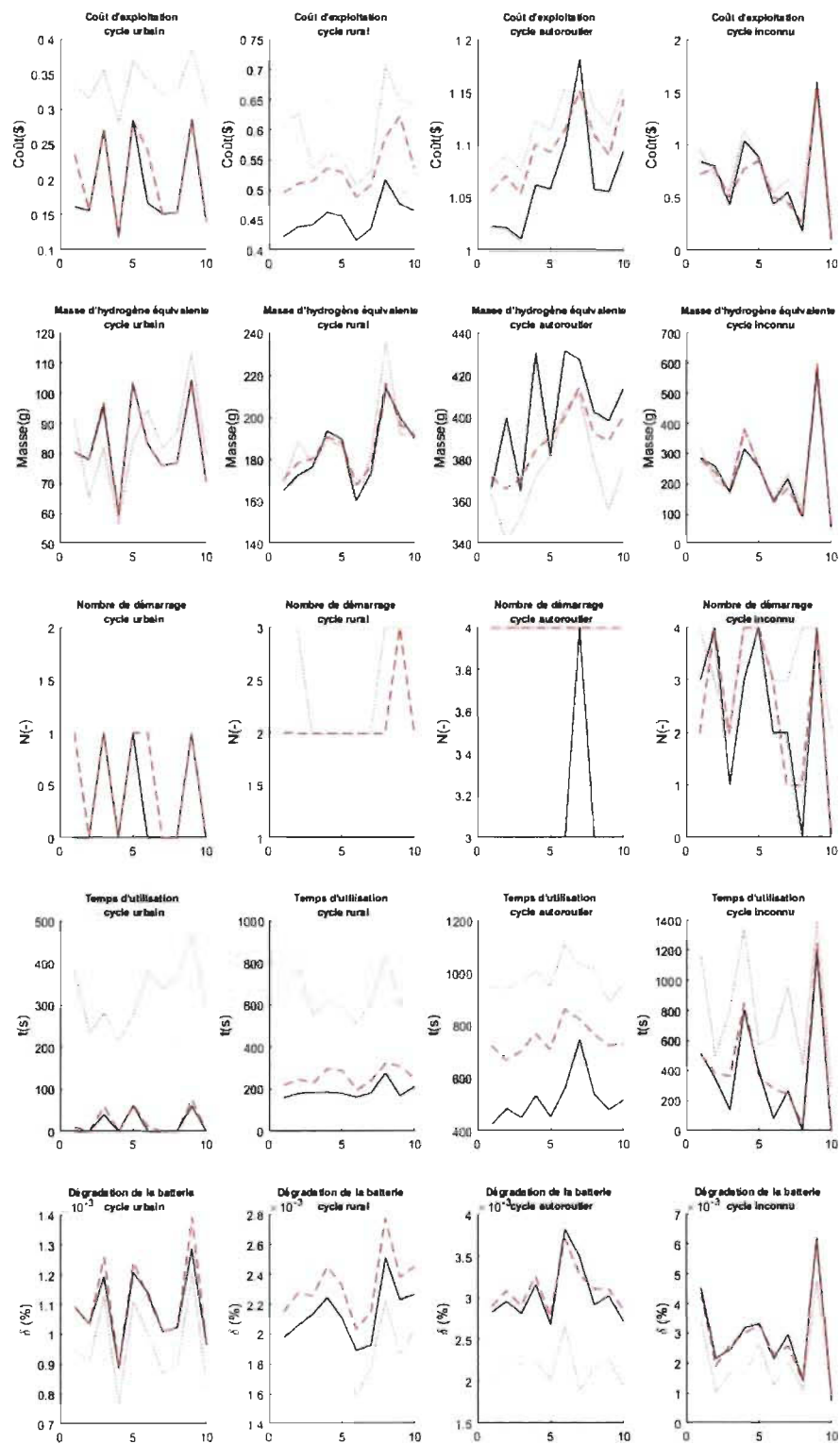


FIGURE E.20 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 59%

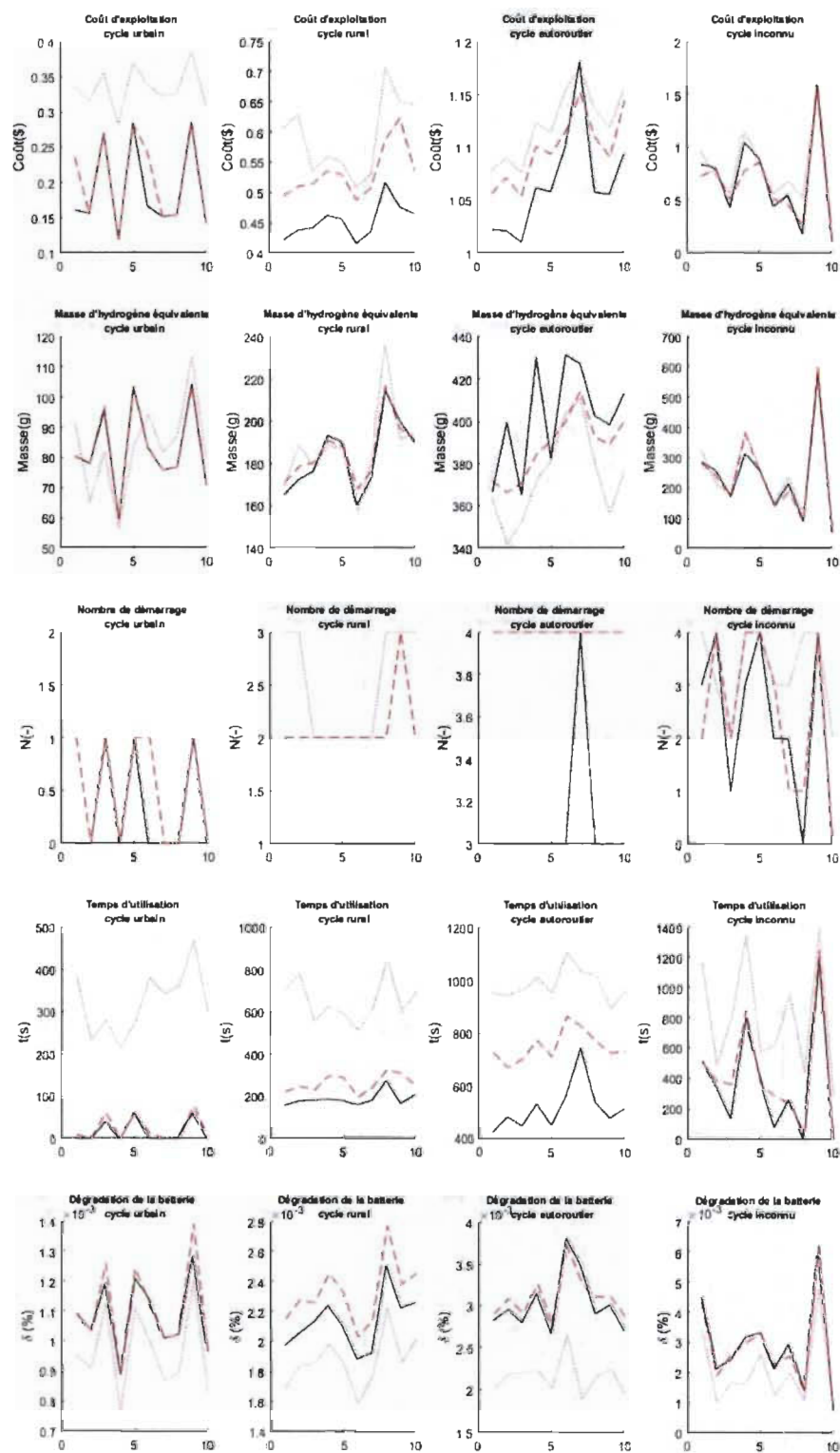


FIGURE E.21 – Résultats obtenus pour les 40 cycles de l'étude avec une état de charge initial de 60%



## Résumé:

L'essor de l'électrification du secteur du transport nécessite le développement de nouvelles technologies. La pile à combustible n'est pas une technologie récemment développée mais elle en profite également. Toutefois, elle reste trop coûteuse et peu durables par rapport aux exigences du marché. Les pistes étudiées dans le but de palier ces différentes barrières technologiques sont principalement orientées sur leur gestion et leurs auxiliaires. Cependant, une minorité grandissante de la communauté scientifique s'intéresse également aux systèmes composées de plusieurs piles à combustible.

Dans le cadre de cette thèse, la gestion et le dimensionnement de systèmes multipiles hybridés avec une batterie sera étudié. Premièrement, nous comparerons les performances des systèmes multipiles aux systèmes monopiles conventionnels. Pour cela, une étude basée sur l'optimisation de la gestion énergétique optimale du système en fonction du dimensionnement est effectuée en utilisant la programmation dynamique. Les résultats obtenus indiquent une nette augmentation des performances au niveau de la consommation et de la durée de vie du système en faveur des systèmes multipiles.

Ensuite, nous concevrons une stratégie de gestion en ligne basée sur la théorie de décision bayésienne. Cette stratégie a pour but d'optimiser la consommation et la durée de vie en se basant sur la connaissance du comportement du conducteur. L'approche proposée a été comparée à d'autres méthodes de gestion énergétique et permet d'obtenir un gain de performance au niveau de la consommation et de la durée de vie du système multipile.

Mots-clés: piles à combustible, batterie, systèmes multisources, gestion énergétique, dimensionnement, optimisation

## Abstract:

The electrification of the transportation industry is on the rise. This rise drives the development of new technologies. Although the fuel cell is not a recently developed technology, it benefits from it. However, it is still too expensive and not durable enough compared to the market's expectations. Scientific research has been focused primarily on their management and its ancillaries. Nevertheless, the interest in multistack fuel cell systems has been rising in the community.

The energy management and the sizing of multistack system hybridized with a battery is the focus of this thesis. First, the performances of such systems is compared to that of single stack systems. To that end, a study based on the determination of the optimal management strategy depending on the sizing has been completed. The main tool used in this study was optimization through dynamic programming. Results show a significant increase in performance in favor of multistack systems.

Then, an online energy management strategy is designed based on Bayesian decision theory. Its goal is to optimize consumption and lifetime by using driver behavior knowledge. This approach has been compared to other energy management strategies and enables performance gains in consumption and lifetime for the multistack system.

Keywords: fuel cell, battery, multisource systems, energy management, sizing, optimization